



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

HELVIO ESTÁCIO LIRA LUCENA

**ESTUDO DA TAXA DE AQUECIMENTO DE UM FORNO MUFLA:
DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL, MODELAGEM MATEMÁTICA E
APLICAÇÃO NO TRATAMENTO TÉRMICO DO AÇO AISI 4340**

JOÃO PESSOA

2025

HELVIO ESTÁCIO LIRA LUCENA

ESTUDO DA TAXA DE AQUECIMENTO DE UM FORNO MUFLA: DETERMINAÇÃO
EXPERIMENTAL, MODELAGEM MATEMÁTICA E APLICAÇÃO NO TRATAMENTO
TÉRMICO DO AÇO AISI 4340

Trabalho de conclusão de curso apresentado para obtenção dos créditos da disciplina de Trabalho de Conclusão da Universidade Federal da Paraíba, Campus João Pessoa, como parte das exigências para graduação no curso de Engenharia Mecânica.

Orientadora: Prof. Dra. Cristiana dos Santos Nunes.

JOÃO PESSOA

2025

Catlogação na publicação Seção de Catalogação e Classificação

L935e Lucena, Helvio Estacio Lira.

ESTUDO DA TAXA DE AQUECIMENTO DE UM FORNO MUFLA:
DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL, MODELAGEM MATEMÁTICA E
APLICAÇÃO NO TRATAMENTO TÉRMICO DO AÇO AISI 4340 /
Helvio Estacio Lira Lucena. - João Pessoa, 2025.

78 f. : il.

Orientação: Dra Cristiana dos Santos Nunes Nunes. TCC (Graduação)
- UFPB/CT.

1. Aço AISI 4340; curva de aquecimento; têmpera. I. Nunes, Dra Cristiana
dos Santos Nunes. II. Título.

UFPB/CT/BSCT

CDU 621(043.2)

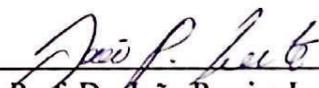
HELVIO ESTÁCIO LIRA LUCENA

ESTUDO DA TAXA DE AQUECIMENTO DE UM FORNO MUFLA: DETERMINAÇÃO
EXPERIMENTAL, MODELAGEM MATEMÁTICA E APLICAÇÃO NO TRATAMENTO
TÉRMICO DO AÇO AISI 4340

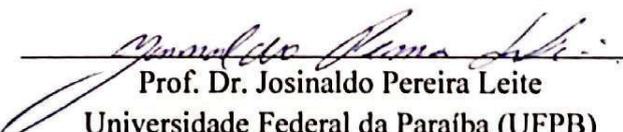
Trabalho de conclusão de curso submetido à **Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica** da UFPB, apresentado em sessão de defesa pública realizada em 25/04/2025, obtendo o conceito **APROVADO**, sob a avaliação da banca examinadora a seguir:



Prof. Dra. Cristiana dos Santos Nunes (Orientadora)
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)



Prof. Dr. João Pereira Leite
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)



Prof. Dr. Josinaldo Pereira Leite
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

JOÃO PESSO (PB)
ABRIL/2025

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar forças, inteligência, sabedoria e motivação para chegar até o fim da graduação.

À Professora Dra. Cristiana dos Santos Nunes, por ter me orientado com toda paciência, eficiência e disponibilidade.

Ao Professor Dr. João Pereira Leite, por me acompanhar nos testes de laboratório, programação e ensaios com o forno.

À minha mãe, por ser a minha principal incentivadora e colaboradora durante todo o meu processo de aprendizagem, desde o início da minha vida escolar.

Ao meu pai, *in memoriam*, por ter orgulho de mim, acreditar no meu potencial e desejar um futuro promissor para minha carreira.

À minha irmã, por me motivar e encorajar a continuar nos momentos de desânimo, frustrações e recomeço da caminhada acadêmica.

À minha tia Maria de Lourdes, por me acolher em sua casa e estar sempre me incentivando nos estudos.

À minha tia Rosirene, seu esposo Jorge e seus filhos, por sempre me apoiarem e orarem por mim em todas as áreas da minha vida.

Ao meu primo Arthur, por ter participado do meu processo de inscrição e matrícula no curso de Engenharia Mecânica.

Ao meu primo Aylson, por ter me ajudado com reforço escolar no início do meu processo de aprendizagem.

À minha prima Adriana, por ter me acompanhado e contribuído para o meu amadurecimento em diversas fases da minha vida.

Ao meu pastor Bertrant, à sua família e toda a igreja Batista no Varadouro, por terem contribuído com suas orações em meu favor durante a graduação.

Aos colegas da turma, pelo compartilhamento de conhecimento, ensinamentos e amizade.

RESUMO

A determinação precisa das curvas de aquecimento dos fornos utilizados em tratamentos térmicos é fundamental para garantir a obtenção das propriedades mecânicas e magnéticas desejadas nos aços. No caso do tratamento térmico de têmpera do aço AISI 4340, esse controle térmico é essencial para promover a formação adequada de martensita, o que, por sua vez, otimiza suas características mecânicas e magnéticas, essenciais para aplicações de alta resistência. Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo estudar a curva de aquecimento de um forno mufla por meio de determinação experimental, desenvolvimento de modelagem matemática e aplicação no tratamento térmico de têmpera do aço AISI 4340, avaliando diferentes programações de controle (ptol 10 e ptol 20) para o aquecimento até a temperatura de austenitização e suas influências nas características finais do material. Foram realizadas medições experimentais das curvas de aquecimento em condições com e sem carga, seguidas de modelagem matemática utilizando diversos modelos de regressão não linear. Após análise dos parâmetros de qualidade de ajuste, o modelo de Gompertz apresentou os melhores resultados, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,9995, indicando excelente representatividade do comportamento térmico do forno. Os resultados demonstraram que a programação ptol 10 atingiu a temperatura de austenitização (870 °C) em menor tempo (85 minutos) comparado à ptol 20 (90 minutos), indicando maior eficiência térmica. Análises microestruturais revelaram variações nas frações de martensita e austenita retida entre as amostras, influenciando diretamente os valores de dureza obtidos. Além disso, observou-se que a amostra CP3 apresentou um valor médio de magnetização de 721,93 Gauss, com desvio padrão de 0,486, indicando uma maior resistência à magnetização em comparação às amostras CP1 e CP2. A programação ptol 10 proporcionou um tratamento térmico mais eficiente, com menor tempo de processamento e resultados microestruturais e magnéticos satisfatórios.

Palavras-chave: Aço AISI 4340; curva de aquecimento; têmpera.

ABSTRACT

The precise determination of the heating curves of furnaces used in heat treatments is essential to ensure the achievement of the desired mechanical and magnetic properties in steels. In the case of the quenching heat treatment of AISI 4340 steel, such thermal control is crucial for promoting the proper formation of martensite, which in turn enhances its mechanical and magnetic characteristics—key requirements for high-strength applications. In this context, the present study aimed to investigate the heating curve of a muffle furnace through experimental measurements, mathematical modeling, and its application in the quenching process of AISI 4340 steel. Two different control settings (ptol 10 and ptol 20) were evaluated during heating up to the austenitizing temperature, and their influence on the final properties of the material was analyzed. Experimental measurements of heating curves were conducted under both loaded and unloaded conditions, followed by nonlinear regression modeling using various mathematical approaches. Among the tested models, the Gompertz model presented the best fit, with a coefficient of determination (R^2) of 0.9995, indicating excellent representation of the furnace's thermal behavior. Results showed that the ptol 10 setting reached the austenitizing temperature (870 °C) in a shorter time (85 minutes) compared to ptol 20 (90 minutes), indicating greater thermal efficiency. Microstructural analyses revealed variations in the fractions of martensite and retained austenite among the samples, directly affecting the measured hardness values. Additionally, sample CP3 exhibited an average magnetization of 721.93 Gauss with a standard deviation of 0.486, indicating higher resistance to magnetization compared to samples CP1 and CP2. Overall, the ptol 10 setting provided a more efficient heat treatment, with reduced processing time and satisfactory microstructural and magnetic results.

Keywords: AISI 4340 steel; heating curve; quenching.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Elementos de Fixação do virabrequim fabricados em aço AISI 4340.....	23
Figura 2	- Diagrama Fe-C.....	27
Figura 3	- Diagrama TRC do aço AISI 4340.....	29
Figura 4	- Diagrama TTT do aço AISI 4340.....	30
Figura 5a	- Amostra de aço ARBL AISI 4340.....	38
Figura 5b	- Diâmetro da amostra.....	38
Figura 6	- Fluxograma da Metodologia.....	39
Figura 7	- Corpo de prova após corte.....	39
Figura 8	- Serra Fita.....	40
Figura 9	- Corpo de prova após faceamento.....	40
Figura 10	- Torno.....	41
Figura 11	- Forno Jung N1100 e J200.....	42
Figura 12	- Representação Esquemática da Operação do Forno na Capacidade Máxima de Aquecimento Programado.....	43
Figura 13	- Repetibilidade da curva de Aquecimento com forno em vazio e Ptol 20 na capacidade máxima de aquecimento programada em dias distintos.....	44
Figura 14	- Curva de Têmpera com forno na capacidade máxima de aquecimento em simulação com Ptol 10 e Ptol 20.....	45
Figura 15	- Arranjo Configurado para realizar as têmperas: a) com Ptol 10, b) com Ptol 20.....	47
Figura 16	- Têmpera do CP 01 (Ptol 20).....	49
Figura 17	- Têmpera do CP 02 (com Ptol 10) com carvão.....	50
Figura 18	- Configuração Experimental: (a) Gerador, (b) Placa de Aquisição e (c) Bancada de Testes.....	50
Figura 19	- Durômetro DIGIMESS.....	51
Figura 20	- Politriz Arotec.....	52
Figura 21	- Microscópio Óptico.....	52

Figura 22	- Representação esquemática dos tratamentos térmicos realizados: a) Condições experimentais em comparação com a programação do forno em vazio e b) detalhamento da curva de aquecimento ao alcançar a temperatura de austenitização programada em função do tempo.....	55
Figura 23	- Estabilização da Temperatura de Austenitização (870°C) do aço AISI 4340 nas programações Ptol10 e Ptol20, sob três diferentes condições com amostra.4340.....	56
Figura 24	- Modelos simulados pelo software RStudio para a curva de aquecimento com Ptol 20, amostra CP1: a) Exponencial1, b) Exponencial2, c) Michierlich, d) Gompertz, e) Logístico, f) Meloun_I, g) Meloun_II, h) Brody, i) VonBertalanffy, j) Michaelis_Menten, k) Geral.....	58
Figura 25	- Modelo Gompertz gerado pelo software Rstudio.....	60
Figura 26	- Modelos simulados pelo software RStudio para a curva de aquecimento com Ptol 10, amostra CP2: a) Exponencial1, b) Exponencial2, c) Michierlich, d) Gompertz, e) Logístico, f) Meloun_I, g) Meloun_II, h) Brody, i) VonBertalanffy, j) Michaelis_Menten, k) Geral.....	61
Figura 27	- Seção transversal do CP1: a) região próxima à borda da amostra, b) região intermediária e c) centro da amostra.....	64
Figura 28	- Seção transversal do CP2: a) região próxima à borda da amostra, b) região intermediária e c) centro da amostra.....	65
Figura 29	- Seção transversal do CP3: a) região próxima à borda da amostra, b) região intermediária e c) centro da amostra.....	67
Figura 30	- Efeito do teor de carbono na transformação da austenita em martensita.....	69
Figura 31	- Dureza média dos corpos de prova.....	70
Figura 32	- Gráfico De Análise Magnética por Sensor Hall.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	-	Classificação dos aços ARBL	20
Tabela 2	-	Composição química do aço AISI 4340	22
Tabela 3	-	Parâmetros de Tratamentos Térmicos de Têmpera Realizados nas Amostras de Aço AISI 4340	41
Tabela 4	-	Medições das alturas dos corpos de prova em (mm)	41
Tabela 5	-	Medições das alturas dos corpos de prova em (mm) após lixamento	42
Tabela 6	-	Registros das temperaturas do forno em vazio Ptol 20 em dias distintos	45
Tabela 7	-	Registros das temperaturas do forno em vazio Ptol 20	46
Tabela 8	-	Dados do forno no aquecimento do CP 01 (Ptol 20)	48
Tabela 9	-	Dados do forno no aquecimento do CP 02 (Ptol 10)	48
Tabela 10	-	Dados do forno no aquecimento do CP 03 (Ptol 10)	49
Tabela 11	-	Modelos Estatísticos Estudados	53
Tabela 12	-	Comparação das Temperaturas nas situações de Ptol 20 e Ptol 10	54
Tabela 13	-	Modelos Simulados pelo Software RStudio para Curvas de Aquecimento com Ptol 20, amostra CP1	57
Tabela 14	-	ANOVA dos modelos de regressão não linear para a curva de aquecimento Ptol20, amostra (CP1)	59
Tabela 15	-	Modelos Simulados pelo Software RStudio para Curvas de Aquecimento com Ptol 10	62

Tabela 16	-	Valores de significância estatística expressiva	62
Tabela 17	-	Valores Estimados dos Coeficientes ajustados nas equações	62
Tabela 18	-	Modelo de regressão não linear selecionado para cada condição experimental de aquecimento aplicado no tratamento térmico de têmpera do aço AISI 4340	63
Tabela 19	-	Fração volumétrica dos microconstituintes presentes na amostra CP1 ...	65
Tabela 20	-	Seção transversal do CP2 a) região próxima à borda da amostra, b) região intermediária e c) centro da amostra	66
Tabela 21	-	Seção transversal do CP3: a) região próxima à borda da amostra, b) região intermediária e c) centro da amostra	67
Tabela 22	-	Fração de fase média presente nas amostras temperadas	68
Tabela 23	-	Dureza Média do aço AISI 4340	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
ARBL	Alta Resistencia e Baixa Liga
HRB	<i>Hardness Rockwell B</i>
HRC	<i>Hardness Rockwell C</i>
LTT	<i>Laboratório de Tratamentos Térmicos</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
TTT	<i>Time-Temperature-Transformation</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVO GERAL	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Aços de Alta Resistência e Baixa Liga	19
2.2	Aço AISI 4340	21
2.3	Tratamento Térmico do Aço AISI 4340	24
2.4	Efeito da Taxa de Aquecimento no Tratamento Térmico	26
2.5	Tratamento Térmico do Aço AISI 4340	26
2.5.1	Diagrama TTT	27
2.5.2	Diagrama TRC	28
2.5.3	Tratamentos Térmicos Aplicados no Aço AISI 4340	29
2.5.4	Influência da Taxa de Aquecimento no TTT	30
2.6	Propriedades Magnéticas dos Aços	31
2.6.1	Propriedades Magnéticas do Aço AISI 4340	31
2.6.2	Influência da Microestrutura Sobre as Propriedades Magnéticas	32
2.6.3	Utilização de Ensaio Magnético para Caracterização dos Aços	33
2.6.4	Sensor Hall	34
2.7	Modelagem Matemática e Regressão Não Linear	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1	Materiais	38
3.1.1	Material de Estudo	38

3.2	Metodologia	38
3.2.1	Corte da Amostra	39
3.2.2	Tratamento térmico	42
3.2.2.1	Forno para tratamento térmico	42
3.2.2.2	Determinação da taxa de aquecimento máxima do forno	43
3.2.2	Tratamento Térmico	46
3.2.3	Ensaio Magnético	50
3.2.4	Ensaio de Dureza	51
3.2.5	Preparação Metalográfica	51
3.2.6	Microscopia Óptica	52
3.2.7	Modelagem Matemática	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
4.1	Curva de Aquecimento	54
4.1.1	Seleção do Modelo de regressão não linear para a curva de aquecimento Ptol 20 .	56
4.1.2	Seleção do modelo de regressão não linear para a curva de aquecimento Ptol 10.....	60
4.1.2.1	Regressão não linear para a curva de aquecimento para CP2	60
4.1.2.2	Regressão não linear para a curva de aquecimento para CP3	63
4.2	Caracterizações Microestruturais	64
4.3	Ensaio de Dureza	69
4.4	Ensaio Magnético	70

5	CONCLUSÃO	72
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	73
	REFERÊNCIAS	74
	APÊNDICE A – PROGRAMAÇÃO DO FORNO MULFA PARA SIMULAÇÃO DE TRATAMENTO TÉRMICO	76
	APÊNDICE B – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DOS MÉTODOS ESTATÍSTICOS: AQUECIMENTO COM PTOL DE 20	77
	APÊNDICE C – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DOS MÉTODOS ESTATÍSTICOS: AQUECIMENTO COM PTOL DE 10	78

1 INTRODUÇÃO

O aço AISI 4340 é da família dos aços ARBL (Alta Resistência e Baixa Liga). Suas características químicas incluem elementos químicos como níquel, cromo e molibdênio em sua composição de liga, conferindo ao material uma combinação equilibrada de resistência mecânica, tenacidade e capacidade de endurecimento. Uma das qualidades desse aço é apresentar excelente resposta a tratamentos térmicos, o que permite alcançar propriedades mecânicas otimizadas, com alta dureza e resistência ao desgaste, sem comprometer sua ductilidade (Callister; Rethwish, 2016).

A origem do aço AISI 4340 de alta resistência e baixa liga data ao desenvolvimento de ligas de aço do século XX, pois os avanços na metalurgia permitiram a criação de materiais com propriedades customizáveis para aplicações industriais. A demanda por características mecânicas e térmicas melhoradas levaram ao estudo de elementos de liga, resultando em materiais como o aço AISI 4340, amplamente utilizado na indústria por desempenho superior em condições extremas (Davis, 1997).

A importância do aço AISI 4340 se dá pela capacidade de suportar altos níveis de tensão e impacto, tornando-o indispensável para setores como a indústria aeroespacial, automotiva e de energia. Componentes críticos, como eixos, engrenagens, fuselagens e hastes de perfuração, frequentemente utilizam esse material devido à sua confiabilidade em condições severas. Sua alta resistência e versatilidade o tornam um dos materiais preferidos para aplicações que exigem longevidade e segurança (Smith; Hashemi; Prasad, 2010).

O aço AISI 4340 é valorizado por sua capacidade de ser processado e modificado através de tratamento térmico, possibilitando ajuste nas propriedades mecânicas conforme as especificações solicitadas. Essa flexibilidade em engenharia dos materiais amplia o seu uso em projetos que requerem desempenho técnico de alta performance contribuindo para avanços tecnológicos em diversos setores (ASM Internacional, 1995).

O tratamento térmico é um conjunto de processos que envolvem o aquecimento e o resfriamento controlados de materiais metálicos, a fim de alterar suas propriedades físicas, químicas e mecânicas. No caso do aço, esses processos permitem ajustar características como dureza, resistência, ductilidade e tenacidade, otimizando sua aplicação em diversas áreas (Callister; Rethwisch, 2022).

Os variados tratamentos térmicos apresentam-se com objetivos distintos. Por exemplo. A têmpera almeja aumentar a dureza e a resistência mecânica utilizando a martensita, enquanto o revenimento alivia tensões internas e melhora a ductilidade, com ajustes na

microestrutura obtida na têmpera. No recozimento há redução da dureza e aumento da ductilidade, além de restaurar a homogeneidade da microestrutura. Já na normalização acontece o refinamento do tamanho dos grãos com o propósito de melhorar as propriedades mecânicas em geral (ASM Internacional, 2016).

A modelagem matemática é amplamente empregada na engenharia para representar e prever o comportamento de sistemas físicos com base em dados experimentais (Kreyszig, 2011). Em especial, quando os fenômenos estudados não seguem relações lineares entre variáveis, é necessário recorrer à regressão não linear para garantir maior precisão no ajuste dos modelos (Montgomery; Peck; Vining, 2012).

1.1 OBJETIVO GERAL

Determinar a curva de aquecimento de um forno mufla por meio de registro experimental e modelagem matemática, e avaliar a influência da taxa de aquecimento, resultante de diferentes configurações de programação, sobre a microestrutura, dureza e propriedades magnéticas do aço AISI 4340 submetido ao tratamento térmico de têmpera.

Objetivos Específicos:

- a) Determinar experimentalmente as curvas de aquecimento do forno mufla em três condições distintas: com o forno vazio operando em potência máxima, com amostras utilizando a programação recomendada pelo fabricante (ptol 20) e com amostras sob uma programação alternativa (ptol 10), por meio da aplicação de regressão não linear para modelagem do comportamento térmico e previsão do tempo necessário para atingir a temperatura programada.
- b) Realizar tratamentos térmicos de têmpera no aço AISI 4340 sob as três configurações diferentes, combinando variações de programação do forno avaliando a influência dessas condições na resposta microestrutural, dureza e propriedades magnéticas do material.
- c) Caracterizar as amostras temperadas por meio de microscopia óptica, ensaio de dureza e análise magnética com sensor Hall, relacionando os resultados microestruturais, mecânicos e magnéticos com as condições térmicas aplicadas e comparando-os com dados da literatura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL)

Segundo Callister (2020) os aços ARBL são definidos como ligas de aço projetados para combinar elevada resistência mecânica com boa ductilidade, sendo, portanto, amplamente empregados na fabricação de estruturas que demandam leveza e resistência, como na indústria automotiva e na construção civil. Esses aços possuem em sua composição elementos de liga, como manganês, silício e molibdênio, o que promove a resistência ao escoamento e a tenacidade ao impacto.

Os aços de alta resistência e baixa liga, assim denominados, são caracterizados por sua alta resistência à tração e baixa relação peso-resistência. Tais propriedades os tornam ideais para aplicação em que a redução do peso estrutural é crítica. Essas características são obtidas por meio de tratamento térmico e adição controlada de elementos como níquel, cromo e cobre (ASM Internacional, 2021).

Abordando as propriedades mecânicas dos aços (ARBL), pode-se dizer que esses materiais foram desenvolvidos com a finalidade de fornecer alta resistência ao escoamento (350 MPa ou mais), além de apresentar boa soldabilidade e conformabilidade, conforme as exigências da indústria em aplicações estruturais e automotivas (Totten; Xie; Funatani, 2018).

Os aços ARBL apresentam propriedades mecânicas e composição química peculiares. A adição de elementos como cromo e molibdênio ajuda a aumentar a resistência ao desgaste e a melhorar a capacidade de suportar altas temperaturas. Além disso a presença de carbono em teores controlados influencia diretamente o limite de escoamento e a resistência à tração do aço, enquanto a ductilidade é preservada, tornando esses materiais versáteis para diversas aplicações (Totten; Xie; Funatani, 2018).

Esses aços são divididos em diferentes categorias, baseando-se em sua aplicação e características específicas. Os aços ARBL de baixa liga, podem ser encontrados em versões de baixa e média resistência à tração, que pode variar de 300 MPa a 700 MPa ou mais, conforme o tipo de liga utilizado. Tal aplicação permite que designers e engenheiros escolham, equilibrando custo e desempenho, o aço mais adequado (Callister, Rethwisch, 2020).

Na indústria automotiva, por exemplo, os aços ARBL são empregados em componentes estruturais de veículos, como chassi, suporte e barra estabilizadora. A combinação de alta resistência e baixo peso é fundamental para a melhoria da eficiência da combustão e da segurança dos automóveis. A leveza do material, aliada à sua elevada resistência mecânica contribui para atender as exigências de desempenho e sustentabilidade. Essa

aplicabilidade se estende a setores que exigem resistência ao impacto em vigas e pilares do ramo da construção (ASM Internacional, 2021).

Além disso, os aços (ARBL) são essenciais na fabricação de componentes de máquinas e ferramentas. Por sua resistência ao desgaste, esses aços são ideais para eixos, engrenagens e outras peças sujeitas a condições de trabalho severas, como altas cargas e atrito constante. Sua utilização em ambientes industriais reduz a necessidade de manutenção frequente e aumenta a durabilidade dos componentes (Totten; Xie; Funatani, 2018).

Em função de suas propriedades específicas, onde a combinação de leveza e resistência é de extrema importância, os aços ARBL também são empregados na indústria aeronáutica. Componentes como fuselagens e suportes estruturais de aeronaves se beneficiam das características desses aços, desempenhando maior performance e segurança (Callister, Rethwisch, 2020).

Segue na Tabela 1 uma sequência de aços caracterizados pela composição de liga, limite de escoamento, resistência à tração, alongamento e seus respectivos usos comuns.

Tabela 1 – Classificação dos aços ARBL

Aço	Composição de liga	Limite de escoamento (Re)	Resistência à tração (Rm)	Alongamento em 80 mm (A80)	Usos comuns
SAE 1010	Baixo carbono, < 30% C, < 60% Mn	190-310 MPa	400-500 MPa	26-32%	Componentes de máquinas, peças automotivas de baixo custo
SAE 1020	Baixo carbono, 0,18-0,23% C, 0,30-0,60% Mn	250-320 MPa	450-550 MPa	24-30%	Estruturas e peças de máquinas, componentes automotivos
SAE 1045	Carbono Médio, 0,42-0,50% C, 0,60-0,90% Mn	400-600 MPa	600-800 MPa	18-22%	Eixos, engrenagens, componentes de alta resistência
AISI 4130	Cromo-molibdênio, 0,28-0,33% C, 0,80-1,10% Cr, 0,15-0,25% Mb	415-655 MPa	650-930 MPa	16-20%	Indústria aeronáutica, peças de alta resistência mecânica

Tabela 1 – Continuação

AISI 4140	Cromo- molibdênio,	400-690 MPa	670-900 MPa	15-20 %	Peças de alto impacto, eixos, engrenagens, Componentes Mecânicos
AISI 4340	Cromo- níquel- molibdênio, 0,38-0,43 C, 0,60-0,80% Cr, 1,65- 2,00% Ni, 0,20-0,30% Mo	515-755 MPa	750-930 MPa	12-18 %	Indústria aeronáutica, Componentes de alta resistência e Impacto

Fonte: Adaptada de ASM International, *Metals Handbook: Properties and Selection of Steels*, 11. ed., Ohio: ASM International, 2021; Totten, G. E.; Xie, L.; Funatani, K., *Handbook of Mechanical Alloy Design*, 2. ed., Boca Raton: CRC Press, 2018.

A composição de liga indica os principais elementos de liga presentes no aço que influenciam suas propriedades mecânicas. O limite de escoamento é a tensão máxima que o material pode suportar sem sofrer deformação plástica permanente. A resistência à tração compreende a maior tensão que o material pode suportar antes de se romper expressa em porcentagem. Usos comuns se referem a aplicabilidade nos diferentes ramos da indústria.

2.2 Aço AISI 4340

O aço AISI 4340 é da classe dos aços de baixa liga e alta resistência mecânica (ARBL), sendo amplamente utilizado em aplicações que requerem elevada tenacidade, resistência à fadiga e boa usinabilidade. Sua composição química inclui elementos que conferem propriedades específicas, como temperabilidade e resistência mecânica após tratamentos térmicos (ASM Internacional, 2020).

A composição química do aço AISI 4340 ARBL inclui os elementos: carbono, manganês, silício, níquel, cromo e molibdênio. A presença de carbono influencia na resistência mecânica, enquanto o níquel e o molibdênio proporcionam elevada tenacidade e resistência à corrosão. Além disso, o cromo contribui para o aumento da resistência ao desgaste (ASM Internacional, 2020).

O manganês e o silício presentes no aço AISI 4340 desempenham um papel fundamental no processo de fabricação e na obtenção de propriedades desejáveis. O manganês promove a desoxidação do aço durante a fusão e melhora sua resistência à tração. Já o silício age como desoxidante adicional e contribui para a resistência ao calor. Em proporções controladas, esses elementos, garantem a uniformidade microestrutural, essencial para peças críticas que operam sob altas tensões mecânicas (Gerdau, 2023).

As propriedades deste aço podem ser ajustadas por têmpera e revenimento, esses tratamentos térmicos maximizam os efeitos de elementos de liga. Por exemplo, a combinação entre níquel, cromo e molibdênio é responsável pela temperabilidade do AISI 4340, proporcionando a obtenção de propriedades mecânicas superiores em peças de grandes dimensões que exigem resistência, tenacidade e durabilidade excepcionais (ASM Internacional, 2020).

A seguir as proporções encontradas nos principais elementos presentes no aço ARBL AISI 4340.

Tabela 2 – Composição química do aço AISI 4340

Elemento	Composição (%)
Carbono (C)	0,38 – 0,43
Manganês (Mn)	0,60 – 0,80
Silício (Si)	0,15 – 0,35
Níquel (Ni)	1,65 – 2,00
Cromo (Cr)	0,70 – 0,90
Molibdênio (Mo)	0,20 – 0,30

Fonte: ASM Internacional 2020.

Devido à sua excelente combinação de propriedades mecânicas, o aço AISI 4340 é muito utilizado na fabricação de componentes mecânicos de engenharia de alta performance. Suas principais aplicações incluem eixo de transmissão/suspensão, engrenagens de alta resistência, bielas e peças de aeronaves, onde a combinação de alta resistência com ductilidade se torna essencial. O aço 4340 encontra aplicação em indústrias como a automotiva, aeroespacial e de petróleo e gás, nas quais a confiabilidade é vital (Gerdau, 2023).

Diversas características de temperabilidade apresentadas pelo aço 4340, relativas ao seu tratamento térmico, possibilitam a obtenção de excelentes propriedades mecânicas em peças de grandes dimensões. Esse material apresenta alta resistência à tração e limite de

escoamento, ao mesmo tempo que apresenta tenacidade considerável. E tais propriedades fazem do aço AISI 4340 ser um material ideal para algumas aplicações em condições extremas de carga e temperatura, apresentando aumento da vida útil dos componentes fabricados com esse material (ASM Internacional, 2020).

Figura 1 – Elementos de Fixação de virabrequim fabricados em aço AISI 4340



Fonte: Aços Nobre, Fachin e Alarcon (2004, p. 34).

O aço AISI 4340 é um aço de baixa liga, conhecido pela resistência mecânica significativa, tenacidade aprimorada, bem como a resposta exemplar às condições de tratamento térmico. Enriquecido com Ni, Cr e Mo, o aço compreende propriedades de resistência e capacidade de endurecimento. A produção do aço começa com a fusão de matérias-primas; geralmente com fornos elétricos ou a oxigênio, seguida de processos de refino que ajustam sua composição química, removendo impureza e atingindo sua proporção ideal dos elementos de liga. Após isso o aço é solidificado seja em lingotes ou placas, para posterior conformação mecânica (ASM Internacional, 1991).

Depois de solidificado, o aço passa por processos de laminação a quente, que permitem ajustar suas dimensões e características estruturais. Durante essa etapa é possível melhorar a homogeneidade do material e reduzir tensões residuais. Após a laminação, o material é submetido a tratamentos térmicos específicos, como recozimento ou normalização, dependendo da aplicação pretendida. Esses tratamentos são ideais para ajustar as propriedades mecânicas, como dureza, ductilidade e resistência à tração (Krauss, 2005).

Quando fornecido no estado recozido, o aço AISI 4340 apresenta uma microestrutura formada predominantemente por perlita e ferrita, o que confere maior maleabilidade e facilidade de usinagem. Esse estado é essencialmente útil em aplicações onde o material precisará ser submetido a processos adicionais de conformação ou soldagem. Além disso, o recozimento ajuda a aliviar tensões internas acumuladas durante a laminação e melhora a estabilidade dimensional do aço (Bryson, 1999).

Por outro lado, no estado normalizado, o aço AISI 4340 apresenta uma estrutura granular mais refinada, composta por perlita e ferrita de grãos mais finos. Esse refinamento estrutural contribui para uma maior uniformidade nas propriedades mecânicas, como resistência ao impacto e à fadiga. O estado normalizado é normalmente preferido quando se busca maior resistência mecânica inicial, reduzindo a necessidade de tratamentos térmicos adicionais antes da utilização final do material (Fontana, 2005).

A escolha entre o fornecimento recozido ou normalizado depende do uso final do aço e das etapas subsequentes do processo de fabricação. Para componentes que exigem elevada resistência e tenacidade, o estado normalizado pode ser vantajoso, enquanto o estado recozido é mais adequado para aplicações que demandam conformação mecânica e usinagem. Esse aspecto satisfaz a versatilidade do AISI 4340, que é capaz de atender uma ampla gama de requisitos industriais (ASM Internacional, 1991).

Assim, o aço AISI 4340 é altamente adaptável, cuja produção e fornecimento em diferentes estados térmicos refletem sua importância em aplicações que vão desde componentes aeronáuticos e automotivos até ferramentas e equipamentos industriais. Sua versatilidade, associada às suas propriedades mecânicas ajustáveis, o tornam uma escolha de destaque em projetos de alta confiabilidade e alto desempenho (Krauss, 2005).

2.3 Tratamento Térmico dos Aços

O tratamento térmico em aços é um processo que submete o material a ciclos de aquecimento e resfriamento controlados para modificar as propriedades mecânicas e estruturais, como dureza, resistência e ductilidade por exemplo. Conforme Dieter e Bacon (2013), essas alterações ocorrem devido a mudanças na microestrutura do aço, promovidas por transformação de fases e difusão atômica, sendo assim, empregadas nas mais variadas peças metálicas de aplicação industrial.

Segundo Callister e Rethwisch (2020), os principais tipos de tratamentos térmicos tem suas peculiaridades. No recozimento acontece o processo de aquecimento do aço a uma temperatura específica, seguindo de resfriamento lento. Esse tratamento reduz tensões internas, melhora a ductilidade e facilita a usinagem e conformação.

Na normalização o tratamento é feito similar ao recozimento, no entanto, o resfriamento é ao ar, resultando em uma microestrutura mais homogênea e com maior resistência mecânica, esse processo é utilizado para refinar o tamanho do grão e melhorar a tenacidade.

Outro tratamento é a têmpera, ela consiste em aquecer o aço acima da temperatura crítica e resfriamento rápido à óleo, água ou ar. Esse tratamento aumenta a dureza e a resistência mecânica, mas pode tornar o material mais frágil.

O revenimento é um tratamento utilizado após a têmpera, envolve o reaquecimento a temperaturas inferiores às críticas, seguindo de resfriamento. Esse processo reduz a fragilidade da têmpera, melhorando a tenacidade sem comprometer excessivamente a dureza.

O tratamento térmico dos aços deve ser realizado em condições controladas para garantir a obtenção das propriedades desejadas, portanto, é essencial utilizar adequadamente fornos, meios de resfriamento e atmosferas protetoras. Cada tipo de tratamento térmico requer um ambiente específico para que ocorram as transformações microestruturais adequadamente.

Segundo Dieter e Bacon (2013), cada tipo de tratamento térmico requer um ambiente específico para que as determinações das microestruturas ocorram de maneira eficiente. No recozimento, por exemplo, o aço deve ser aquecido lentamente em fornos de atmosfera controladas para evitar oxidação, sendo resfriado dentro do próprio forno, de forma lenta e uniforme, garantindo a remoção de tensões internas e obtenção de uma estrutura mais dúctil.

O tratamento térmico dos aços deve ser realizado em condições controladas para garantir a obtenção das propriedades desejadas, sendo essencial o uso adequado de fornos, meios de resfriamento e atmosferas protetoras. A escolha do meio adequado para cada tratamento térmico é fundamental para obter um controle preciso das propriedades mecânicas e estruturais do aço, influenciando diretamente em sua aplicação industrial.

Segundo Callister e Rethwisch (2020), para cada tipo de tratamento térmico há uma aplicação com objetivo específico, considerando fatores como tipo de aço, condições de serviço e propriedades desejadas. A aplicação dos tratamentos térmicos nos aços deve ser cuidadosamente planejada para atender às exigências mecânicas e estruturais dos componentes industriais.

A aplicação do tratamento térmico denominado de recozimento é realizada em peças que necessitam de maior conformabilidade e usinabilidade, como chapas metálicas e componentes forjados. É aplicado antes de processos de conformação mecânica ou após soldagens para alívio de tensões.

A normalização é indicada para peças que necessitam de maior conformabilidade e usinabilidade, como chapas metálicas e componentes forjados. É empregada antes de processos de conformação mecânica ou após soldagens para alívio de tensões.

A têmpera é aplicada em ferramentas, rolamentos e componentes sujeitos a alto desgaste. A têmpera é essencial na produção de peças que exigem elevada dureza e resistência ao impacto, como facas, matrizes e peças de máquinas.

A aplicação do revenimento é realizada após a têmpera, é empregado em eixos, molas e peças automotivas para reduzir fragilidade e melhorar a tenacidade. A temperatura de revenimento é ajustada conforme a dureza e resistência desejadas.

2.4 Efeito da Taxa de Aquecimento no Tratamento Térmico

Segundo Callister e Rethwisch (2020), a taxa de aquecimento afeta diretamente a cinética das transformações de fase no aço, influenciando o tamanho de grão, a formação de fases intermediárias e a distribuição de carbonetos. Uma taxa de aquecimento elevada pode resultar em grãos mais finos, enquanto um aquecimento mais lento favorece a difusão atômica e a homogeneização da microestrutura.

De acordo com Dieter e Bacon (2013), a taxa de aquecimento pode alterar significativamente as propriedades mecânicas do aço tratado termicamente. Um aquecimento rápido pode levar a tensões térmicas internas e afetar a dureza e a resistência do material, enquanto um aquecimento mais gradual tende a reduzir distorções e melhorar a tenacidade.

Conforme ASM International (2016), a velocidade com que o aço atinge a região de austenitização influencia a dissolução dos carbonetos e a distribuição dos elementos de liga. Uma taxa de aquecimento mais alta pode reduzir o tempo necessário para a transformação da austenita, enquanto um aquecimento mais lento permite uma dissolução mais completa dos carbonetos, afetando a resposta do material ao resfriamento subsequente.

Segundo Totten e Howes (1997), a taxa de aquecimento não afeta apenas a etapa de aquecimento, mas também o comportamento do material durante o resfriamento e o revenimento. O controle preciso dessa variável é essencial para garantir a obtenção das propriedades desejadas, evitando defeitos como fragilidade excessiva ou crescimento de grão exagerado.

2.5 Tratamento Térmico do Aço AISI 4340

O tratamento térmico é estabelecido por processos utilizados na metalurgia para modificar as propriedades mecânicas, físicas e estruturais de metais e ligas metálicas. esses processos compreendem o aquecimento e resfriamento dos metais em temperaturas controladas,

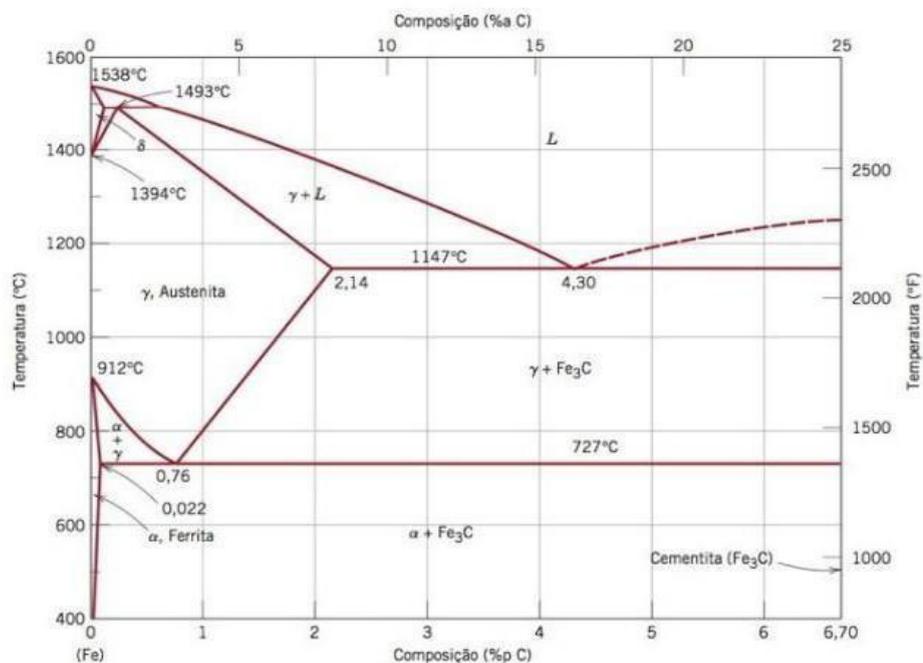
com objetivo de alterar características como dureza, resistência, ductilidade e tenacidade (Callister; Rethwisch, 2022).

O aquecimento do aço AISI 4340 passa pela etapa de austenitização, neste processo o material é aquecido entre 830 °C e 870 °C, na zona de austenitização, para transformar sua microestrutura em austenita, uma fase cristalina de alta temperatura. Para evitar tensões residuais e deformações se faz necessário utilizar aquecimento uniforme (ASM Internacional, 2016).

2.5.1 Diagrama TTT

As curvas TTT (Tempo, Temperatura e Transformação) são representações gráficas que descrevem as transformações de fases em aços e outras ligas metálicas sob condições isotérmicas, em outras palavras é uma ferramenta capaz de prever e controlar mudanças microestruturais durante o tratamento térmico, a fim de obter propriedades mecânicas específicas. Conforme o Diagrama Fe-C da Figura 2.

Figura 2 – Diagrama Fe-C



Fonte Callister (2013).

As transformações de fases realizadas em materiais metálicos são essenciais para o controle das propriedades mecânicas dos metais, sendo os diagramas TTT fundamentais para prever essas transformações durante tratamentos térmicos (Santos, 2024).

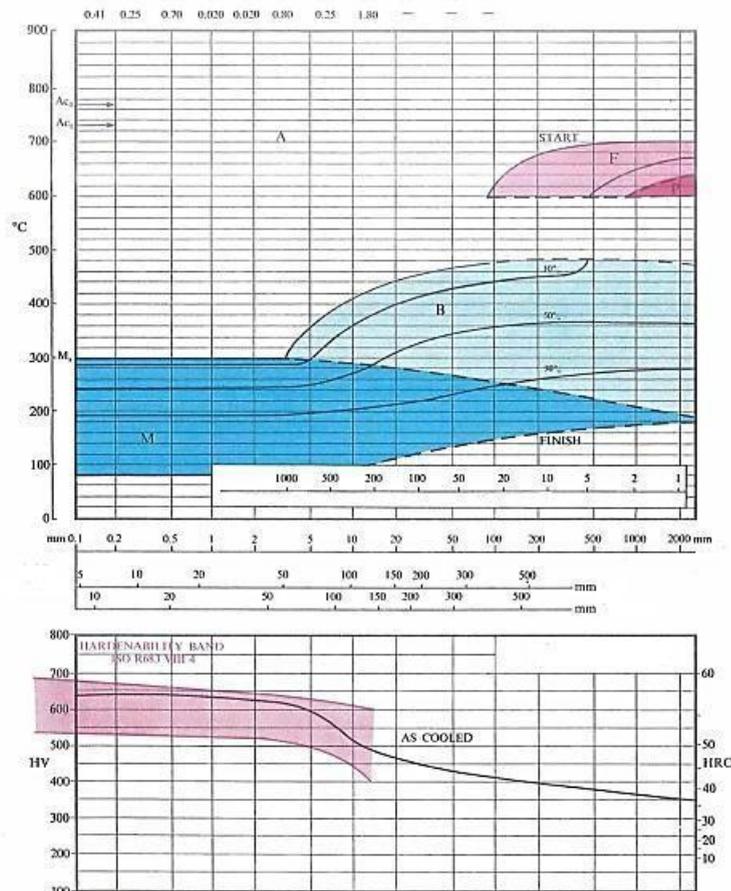
A caracterização experimental e a construção do diagrama TTT para aços específicos, como o SAE 1080, permite uma melhor compreensão das fases resultantes dos diferentes tratamentos térmicos, cooperando no aprimoramento dos mais variados processos industriais (Mignoto, 2019).

2.5.2 Diagrama TRC

O diagrama TRC é fundamental para compreender a transformação de fases do aço AISI 4340 em diferentes condições de resfriamento. Estudos demonstram que a construção desse diagrama permite analisar o efeito da temperatura e do tempo de resfriamento na microestrutura do material, fornecendo informações essenciais sobre a formação de martensita, bainita e perlita em diferentes taxas de resfriamento. Além disso, ele auxilia na previsão das propriedades mecânicas finais do aço tratado termicamente (Bokes et al., 2020).

A taxa de aquecimento influencia diretamente o comportamento do aço AISI 4340 durante o resfriamento e, conseqüentemente, a interpretação do diagrama TRC. Estudos indicam que variações na taxa de aquecimento alteram a temperatura de austenitização e o tempo necessário para a transformação de fases, o que impacta na dureza final e na resistência mecânica do aço. Dessa forma, um entendimento detalhado do diagrama TRC, conforme Figura 3, é fundamental para prever e controlar as propriedades desejadas do material após tratamentos térmicos específicos (Lee & Tzay-Tian, 1999).

Figura 3 – Diagrama TRC do aço AISI 4340



Fonte: Atkins, (1980).

2.5.3 Tratamentos térmicos aplicados no aço AISI 4340

A aplicação do planejamento de experimentos no estudo dos parâmetros de temperatura do aço AISI 4340 tem demonstrado que fatores como a temperatura de austenitização, tempo de patamar e tipo de meio de resfriamento influenciam diretamente as propriedades mecânicas, especialmente a dureza e a fração de martensita formada (SILVA *et al.*, 2021).

Estudos voltados à análise das propriedades magnéticas e da quantificação da austenita retida em aços SAE 4340 indicam que a microestrutura final é sensível aos parâmetros térmicos do processo, sendo possível correlacionar a fração de austenita com dados magnéticos e difração de raios X (Oliveira; Moura; Santos, 2020).

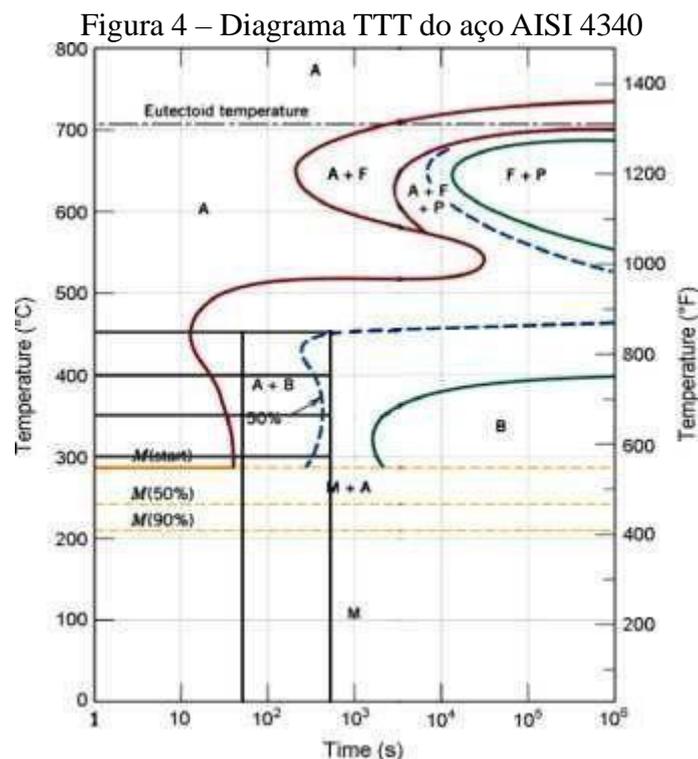
Embora focado em aços ferríticos inoxidáveis, pesquisas mostram que a variação da taxa de aquecimento influencia significativamente o tamanho de grão, a textura cristalográfica e a precipitação de fases secundárias, o que evidencia a importância desse parâmetro também em ligas como o AISI 4340 (Costa; Nascimento; Lima, 2022).

2.5.4 Influência da taxa de aquecimento no TTT

A taxa de aquecimento durante o tratamento térmico de aços, como o AISI 4340, influencia significativamente as temperaturas críticas de transformação, afetando a formação de fases e as propriedades mecânicas finais do material.

Estudos indicam que taxas de aquecimento mais elevadas podem elevar as temperaturas Ac_1 e Ac_3 , deslocando as curvas de transformação para a direita nos diagramas TTT. Isso implica que, em processos dinâmicos como soldagem ou aquecimento por indução, o uso de dados de diagramas TTT convencionais, obtidos com taxas de aquecimento mais lentas, pode não ser adequado para prever com precisão as transformações de fase, podendo resultar em austenitização (Krauss, 2015).

As temperaturas críticas Ac_1 e Ac_3 correspondem aos limites de início e fim da formação de austenita durante o aquecimento de aços, sendo fundamentais para o controle dos tratamentos térmicos. Abaixo de Ac_1 , o material apresenta estrutura ferrítica ou perlítica, enquanto acima de Ac_3 encontra-se totalmente austenítico (Callister; Rethwish, 2021). Conforme Figura 4.



Fonte: Muransky; Barnett; Carr, (2013, p. 2).

2.6 Propriedades Magnéticas dos Aços

O comportamento magnético dos aços está intrinsecamente ligado à sua estrutura cristalina e à presença de elementos ferromagnéticos, como o ferro. A disposição dos átomos e as fases presentes, como ferrita, austenita e martensita, influenciam diretamente as propriedades magnéticas do material (Cullity & Graham, 2011).

Os diferentes tipos de aços exibem comportamentos magnéticos distintos. Aços carbono e de baixa liga, predominantemente ferríticos ou martensíticos, são geralmente ferromagnéticos. Por outro lado, aços inoxidáveis austeníticos, como os das séries 300, tendem a ser não magnéticos devido à sua estrutura cristalina, embora possam apresentar magnetismo residual após deformações mecânicas (Callister & Rethwisch, 2018).

A seleção de aços com propriedades magnéticas específicas é crucial em diversas aplicações industriais. Por exemplo, aços com alta permeabilidade magnética e baixas perdas por histerese são preferidos em núcleos de transformadores e motores elétricos, enquanto aços não magnéticos são essenciais em equipamentos médicos de ressonância magnética para evitar interferências (Kumar & Gupta, 2015).

2.6.1 Propriedades magnéticas no aço AISI 4340

O aço AISI 4340 é classificado como um material ferromagnético devido à sua elevada concentração de ferro na matriz, o que lhe confere forte interação com campos magnéticos externos. Essa característica o torna magnetizável com facilidade e capaz de manter certa magnetização mesmo após a remoção do campo aplicado, especialmente quando em condições estruturais como ferrita ou martensita (Cullity & Graham, 2011).

As propriedades magnéticas do AISI 4340 estão diretamente relacionadas à sua microestrutura, que pode variar em função de tratamentos térmicos. Estruturas como ferrita e martensita mantêm o comportamento ferromagnético, enquanto a austenita, formada a altas temperaturas, apresenta caráter paramagnético, perdendo a capacidade de manter magnetização na ausência de campo externo. A reversão desse efeito ocorre após a transformação da austenita em fases ferromagnéticas no resfriamento (Callister & Rethwisch, 2018).

Por ser um material ferromagnético, o AISI 4340 é amplamente compatível com ensaios não destrutivos por partículas magnéticas. Essa técnica aproveita sua capacidade de concentração de linhas de fluxo magnético para detectar discontinuidades superficiais e subsuperficiais em componentes críticos, sendo particularmente útil na indústria aeronáutica e

automotiva, onde esse aço é comumente aplicado (Kumar & Gupta, 2015).

Embora o aço AISI 4340 contenha elementos de liga como níquel, cromo e molibdênio (que conferem maior resistência mecânica, temperabilidade e estabilidade térmica); tais elementos não anulam seu comportamento ferromagnético. Na verdade, a interação desses elementos com a matriz ferrosa altera levemente as propriedades magnéticas, como a permeabilidade e a coercividade, sem comprometer a magnetização global do material (Totten & MacKenzie, 2003).

Apesar de não ser tradicionalmente classificado como aço magnético funcional, o AISI 4340 pode ter seu comportamento magnético relevante em determinadas aplicações. Em ambientes industriais que envolvem sensores eletromagnéticos ou equipamentos sujeitos a campos magnéticos, o conhecimento do grau de magnetização do material se torna importante para evitar interferências, além de permitir o monitoramento de integridade estrutural por métodos magnéticos (Cullity & Graham, 2011).

2.6.2 Influência da microestrutura sobre a propriedade magnética

O magnetismo em materiais ferrosos está diretamente relacionado à sua estrutura cristalina e à ordem atômica interna. Em metais como o ferro, a magnetização ocorre devido ao alinhamento dos domínios magnéticos, que são regiões em que os momentos magnéticos dos átomos estão orientados na mesma direção. A presença de elementos de liga e a organização atômica na microestrutura têm papel crucial na facilidade com que esses domínios podem ser alinhados sob a influência de um campo magnético externo (Cullity & Graham, 2011).

As diferentes fases presentes em uma liga metálica, como o aço, apresentam comportamentos magnéticos distintos. Por exemplo, a ferrita e a martensita são ferromagnéticas, o que significa que podem ser magnetizadas, enquanto a austenita é paramagnética, ou seja, perde a magnetização quando o campo externo é retirado. A microestrutura, portanto, tem um impacto direto sobre as propriedades magnéticas, influenciando parâmetros como a permeabilidade magnética e a coercividade do material (Callister & Rethwisch, 2018).

O tratamento térmico de um material, como o aço, altera significativamente sua microestrutura, o que impacta diretamente suas propriedades magnéticas. Durante o processo de austenitização, a estrutura ferromagnética do material pode ser transformada em austenita, que é paramagnética. Já a têmpera, que visa gerar martensita, mantém o comportamento ferromagnético, mas altera outras propriedades magnéticas, como a coercividade. Assim, o controle térmico adequado permite o ajuste das propriedades magnéticas conforme as

necessidades específicas da aplicação (Totten & MacKenzie, 2003).

O tamanho do grão em um material metálico tem influência direta na mobilidade dos domínios magnéticos. Quanto menor o tamanho do grão, maior a facilidade de movimentação desses domínios, o que resulta em maior permeabilidade magnética e menor coercividade. Além disso, defeitos cristalinos, como inclusões não metálicas e discordâncias, podem restringir essa mobilidade, prejudicando as propriedades magnéticas. Assim, o controle da microestrutura, incluindo a redução do tamanho de grão, é fundamental para otimizar as propriedades magnéticas de materiais ferrosos (Chikazumi, 1997).

A compreensão da influência da microestrutura nas propriedades magnéticas é crucial para aplicações industriais, como em motores elétricos, transformadores e sensores magnéticos, onde a permeabilidade magnética e a resistência à desmagnetização desempenham um papel fundamental. A presença de fases ferromagnéticas e o controle do tamanho de grão podem melhorar a eficiência desses dispositivos, além de reduzir as perdas por histerese. A engenharia da microestrutura, portanto, é um aspecto importante no desenvolvimento de materiais com desempenho magnético otimizado para essas aplicações (Bozorth, 1993).

2.6.3 Utilização de ensaios magnéticos para caracterização dos aços

O comportamento magnético dos aços é determinado principalmente pela presença de ferro e pela organização de seus átomos em estruturas cristalinas que favorecem o alinhamento de domínios magnéticos. A capacidade de magnetização dos aços ferromagnéticos está relacionada à mobilidade desses domínios, à coercividade e à retentividade, características que variam com a composição química e a condição microestrutural do material (Cullity & Graham, 2011).

O ensaio por partículas magnéticas é amplamente utilizado na inspeção de aços ferromagnéticos, permitindo a detecção de trincas, poros e outras discontinuidades superficiais e subsuperficiais. A técnica se baseia na interrupção do campo magnético aplicado, criando fugas de fluxo que atraem partículas finamente divididas, evidenciando defeitos que não seriam visíveis a olho nu, especialmente em peças forjadas ou soldadas (ASM International, 2002).

As curvas de histerese fornecem informações detalhadas sobre o ciclo de magnetização de um material, como a coercividade, a remanência e as perdas por histerese. Essas propriedades são influenciadas pela microestrutura e pelos tratamentos térmicos aplicados ao aço, sendo úteis para distinguir materiais com diferentes estados internos ou históricos de processamento (Bozorth, 1993).

A microestrutura do aço, composta por fases como ferrita, martensita ou austenita, influencia diretamente sua resposta a campos magnéticos. Enquanto ferrita e martensita exibem comportamento ferromagnético, a austenita é paramagnética, o que compromete a resposta em ensaios magnéticos. Além disso, o tamanho de grão, as tensões internas e a presença de defeitos também afetam a sensibilidade e a interpretação dos resultados (Callister & Rethwisch, 2018).

Os ensaios magnéticos oferecem vantagens como rapidez, baixo custo e capacidade de aplicação em campo, sendo muito úteis para manutenção preventiva. No entanto, apresentam limitações significativas, como a restrição a materiais ferromagnéticos e a dependência da orientação das descontinuidades em relação ao campo magnético aplicado, exigindo profissionais capacitados para sua correta execução e interpretação (Kumar & Gupta, 2015).

Em ambientes industriais, os ensaios magnéticos são frequentemente utilizados para monitorar a integridade de componentes estruturais e avaliar o efeito de tratamentos térmicos. Em motores, turbinas e engrenagens, por exemplo, esses ensaios ajudam a garantir que as peças estejam livres de falhas críticas, contribuindo para a segurança e a confiabilidade dos sistemas onde os aços são empregados (ASM International, 2002).

2.6.4 Sensor Hall

O sensor de efeito Hall, ou simplesmente sensor Hall, é um dispositivo eletrônico que detecta a presença de campos magnéticos e converte essa informação em um sinal elétrico. Seu funcionamento é baseado no efeito Hall, fenômeno descoberto por Edwin Herbert Hall em 1879, que descreve a geração de uma diferença de potencial transversal quando um condutor com corrente elétrica é submetido a um campo magnético perpendicular.

Segundo Pradeep *et al.* (2010), o sensor Hall é capaz de detectar defeitos da ordem de alguns micrômetros, variando de acordo com a intensidade do campo magnético aplicado e da distância entre o sensor e a superfície da peça inspecionada. Essa técnica é amplamente utilizada na avaliação de materiais ferromagnéticos, como os aços e ligas ferrosas, nos quais as variações de campo magnético são mais intensas e facilmente detectáveis.

Conforme, conforme destacado por Jiles (1991), o sensor Hall também pode ser empregado na detecção de campos magnéticos residuais ou na análise de campos induzidos por correntes elétricas em materiais condutores não ferromagnéticos. Essa versatilidade permite que o método seja aplicado a uma variedade de materiais, expandindo sua utilidade além do setor metalúrgico.

A aplicação dos sensores Hall em ensaios magnéticos é importante para avaliar propriedades magnéticas, detectar falhas internas ou superficiais e medir a intensidade e a distribuição dos campos magnéticos presentes nos materiais. Os valores dos campos magnéticos são geralmente expressos pela grandeza β , cuja unidade de medida é o Gauss (G).

2.7 Modelagem Matemática e Regressão Não Linear

De acordo com Kreyszig (2011), a modelagem matemática é uma ferramenta essencial para a compreensão de sistemas físicos e de engenharia, pois permite descrever fenômenos complexos por meio de equações diferenciais, relações algébricas e estatísticas, contribuindo para a previsão e otimização de resultados.

Existem diferentes tipos de modelos matemáticos que são usados para ajustar dados experimentais do aquecimento de fornos. Cada modelo tem uma forma matemática distinta que tenta descrever a relação entre a variável dependente (a temperatura ou o processo de aquecimento) e a variável independente (como o tempo ou a posição no forno). Os modelos listados incluem:

- a) Exponencial1, Exponencial2: Modelos exponenciais, onde o comportamento de aquecimento ou resfriamento é ajustado por uma função exponencial. Esses modelos são comuns para processos que seguem um padrão de crescimento ou decaimento rápido.
- b) Gompertz, Logístico, Von Bertalanffy, entre outros: descrevem comportamentos do tipo sigmoide, caracterizados por um crescimento lento no início, aceleração em uma fase intermediária e estabilização ao final do processo. Esse padrão se assemelha ao comportamento típico de aquecimento de fornos, em que a taxa de aumento de temperatura varia ao longo do tempo.
- c) Michaelis-Menten: embora originalmente desenvolvido para processos bioquímicos, esse modelo é eficaz na descrição de sistemas que apresentam saturação, podendo também ser aplicado a fenômenos físicos como a transferência de calor, desde que haja limitação ou saturação térmica (SILVA *et al.*, 2023).

A utilização desses modelos não lineares é adequada para representar fenômenos de crescimento ou variação dinâmica, pois permitem maior flexibilidade na forma da curva ajustada e maior fidelidade ao comportamento real do sistema (Ribeiro; Silva, 2023).

O coeficiente de determinação (R^2) quantifica a proporção da variabilidade nos dados experimentais explicada pelo modelo ajustado. O valor de R^2 varia entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1, melhor é o ajuste do modelo.

$$R^2 = \sum Q_{regressão} / \sum Q_{total} \quad (1)$$

Onde $\sum Q_{regressão}$ é a soma de quadrados de regressão e $\sum Q_{total}$ é a soma de quadrados total.

O R^2 ajustado é uma versão modificada do R^2 tradicional que considera o número de parâmetros do modelo. Esse indicador é especialmente útil na comparação entre modelos com complexidades distintas, pois penaliza o uso excessivo de parâmetros que não contribuem de forma significativa para a melhoria do ajuste (Motulsky; Christopoulos, 2004).

$$R^2_{ajust.} = R^2(n - p) - p / n - p - 1 \quad (2)$$

Onde p é número de parâmetros e n é o número amostral.

O AIC (Critério de Informação Akaike) é uma métrica estatística que avalia o equilíbrio entre a qualidade do ajuste e a complexidade do modelo. Modelos com menor valor de AIC são preferidos, pois indicam melhor ajuste com menor sobreajuste aos dados.

$$AIC = -2\log L(\theta) + 2(p) \quad (3)$$

Onde L é o estimador de verossimilhança do modelo de regressão e p é o número de parâmetros no modelo de regressão.

O BIC (Critério de Informação Bayesiano) é similar ao AIC, mas usa uma penalização maior para o número de parâmetros. Assim como o AIC, o objetivo é encontrar o modelo mais simples que ainda ofereça um bom ajuste aos dados. O BIC também é usado para comparar modelos com diferentes números de parâmetros. Quanto menor o valor do BIC, melhor o modelo (Burnham; Anderson, 2002).

$$BIC = -2\log f(x_n/\theta) + p\log(n) \quad (4)$$

Onde L é estimador de máxima verossimilhança do modelo de regressão, p é o número de parâmetros no modelo de regressão e n é o número de observações (tamanho

amostra).

Em particular, o tratamento térmico de aços exige controle preciso da temperatura e da taxa de aquecimento, o que pode ser simulado com o uso de softwares baseados em regressões e métodos numéricos (Totten, 2006).

Nesse contexto, a regressão não linear torna-se essencial para descrever o comportamento de propriedades térmicas e microestruturais, cujas relações com os parâmetros de processo não seguem padrões lineares (Cahn; Haasen, 1996).

Além disso, simulações computacionais têm sido aplicadas com sucesso na previsão do comportamento das fases após a têmpera, contribuindo para a eficiência e qualidade do tratamento (Bhadeshia, 2001).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

3.1.1 Material de estudo

O aço utilizado neste trabalho foi o aço ARBL AISI 4340, fornecido pelo Laboratório de Tratamento Térmico (LTT) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB). A amostra veio na forma de barra redonda com 25,4 mm de diâmetro e 485 mm de comprimento, conforme ilustrado na Figura 5a e 5b.

Figura 5 – a) Amostra de aço ARBL AISI 4340; b) Diâmetro da amostra.

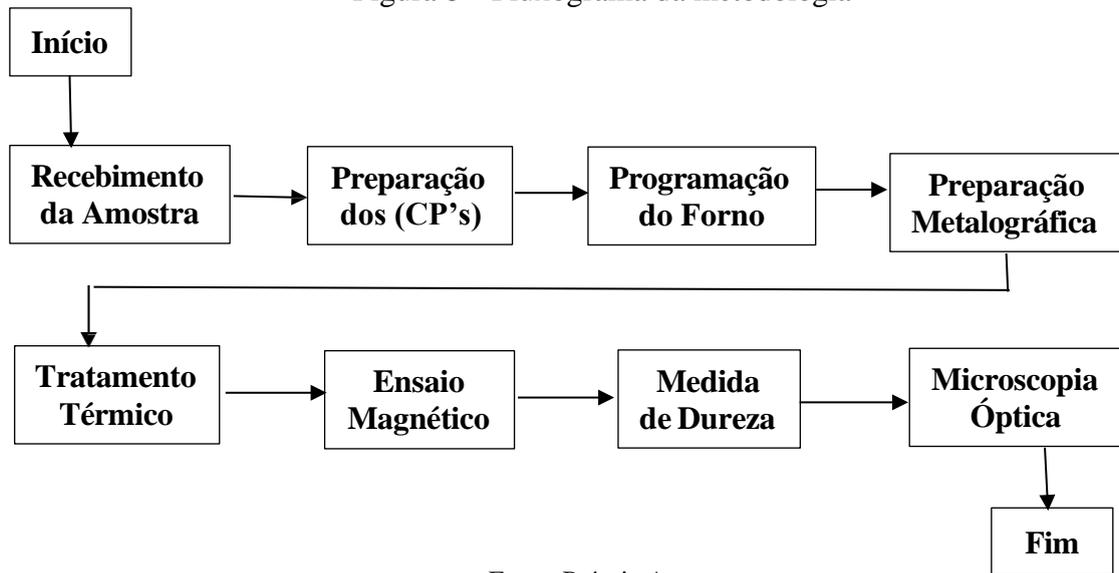


Fonte: Próprio Autor.

3.2 Metodologia

Para organizar os métodos utilizados no estudo, foi criado um fluxograma que designa a sequência de todas as etapas realizadas no estudo, em forma fluxograma, como pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 – Fluxograma da metodologia



Fonte: Próprio Autor.

3.2.1 Corte da Amostra

A amostra de aço AISI 4340 foi seccionada em 3 corpos de prova com altura aproximada de 33 mm, ilustrada na Figura 7. O corte foi realizado pelo técnico no Laboratório de Materiais Metálicos (LAMAM) da UFPB utilizando uma serra fita de modelo MR-122 da Manrod Quality Machines conforme Figura 8.

Figura 7 – Corpo de prova após corte



Fonte: Próprio autor.

Figura 8 – Serra Fita

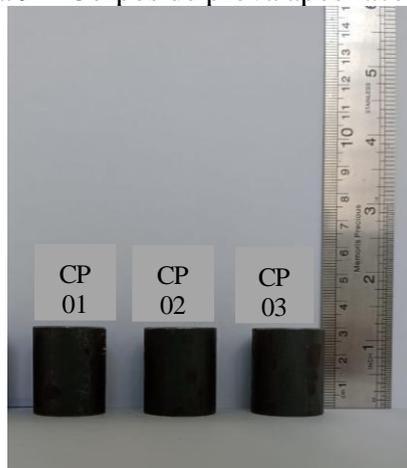


Fonte: Próprio autor.

Após o corte, cada seção foi desbastada na Oficina Mecânica da UFPB em suas faces até atingir uma altura final de 30 mm, como pode-se observar na Figura 9. As alturas foram ajustadas através de um torno de modelo Romi, conforme a Figura 10 pelo técnico da Oficina. Esse preparo visou adequar as amostras para o posterior ensaio magnético com sensor Hall.

Os corpos de prova foram separados e identificados de acordo com a Figura 9 e Tabela 3.

Figura 9 – Corpos de prova após faceamento



Fonte: Próprio autor.

A divisão das amostras para utilização nos tratamentos térmicos de têmpera foi feita conforme indicado na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros de Tratamentos Térmicos de Têmpera Realizados nas Amostras de Aço AISI 4340

Amostras	Varição de Temperatura Tolerável (Ptol)	Temperatura de Austenitização (°C)	Tempo de Enxarque (min)	Meio de Resfriamento
CP 01	Ptol 20	870	20	Água
CP 02	Ptol 10	870	20	Água
CP 03	Ptol 10	870	20	água

Fonte: Próprio Autor.

Figura 10 – Torno



Fonte: Próprio autor.

Para controle dimensional foram realizadas três medições das alturas dos corpos de prova estudados, medidos com o auxílio de um paquímetro de resolução de 0,5 mm. Dessas medições foram calculadas as médias das alturas e os seus respectivos desvios, conforme a Tabela 3 é possível notar que as amostras obtiveram média total de 29,95 mm e desvio padrão 0,03, em conformidade com a especificação de $30 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$.

Tabela 4 – Medições das alturas dos corpos de prova em (mm)

Corpos de Prova	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Desvio Padrão
CP1	30,00	29,95	29,95	29,97	0,03
CP2	29,90	29,95	29,95	29,93	0,03
CP3	29,95	29,90	30,00	29,95	0,05
Média	29,95	29,95	29,95	29,95	0,03

Fonte: Próprio autor.

Os CP's passaram pelas lixas de carboneto de silício (SiC) 320, 400, 600, 1200 *Mush*, após isso foram realizadas três medições com o paquímetro de resolução 0,5 mm para checagem das alturas dos CP's, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 – Medições das alturas dos corpos de prova em (mm) após lixamento

Corpos de Prova	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Desvio Padrão
CP1	29,90	29,90	29,95	29,92	0,030
CP2	29,85	29,80	29,85	29,83	0,030
CP3	29,85	29,90	29,90	29,88	0,030
Média	29,85	29,90	29,90	29,88	0,030

Fonte: Próprio autor.

3.2.2 Tratamento Térmico

3.2.2.1 Forno para tratamento térmico

Foi utilizado o forno Mufla Jung, modelo LF0091202, para temperaturas até 1200°C, capacidade 9,5 litros, dimensões internas úteis (mm) 160x170x350 (AxLxP) e peso 55 kg, possuindo dois controladores digitais, sendo um para operação microprocessado PID N1100 e outro de segurança J200; localizado no Laboratório de Tratamento Térmico (LTT) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), ilustrado na Figura 11.

Figura 11 – Forno Jung N1100 e J200



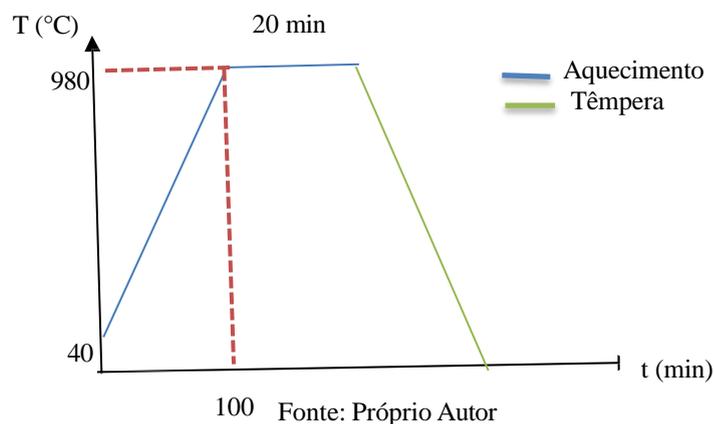
Fonte: Próprio autor.

3.2.1.2 Determinação da taxa de aquecimento máxima do forno

Para determinar a taxa máxima de aquecimento do forno mufla, foi utilizada uma programação nos controladores N1100 e J200, configurados para exigir a capacidade máxima de aquecimento no menor tempo possível. O acompanhamento foi realizado *in loco*, com registros da temperatura correspondente em intervalos de 10 minutos. A programação seguiu os valores recomendados pelo fabricante, além das instruções sobre a ativação do equipamento e a configuração das taxas de aquecimento e resfriamento, de acordo com os parâmetros necessários para a programação desejada.

Os parâmetros de temperaturas adotados no controlador principal N1100 foi de 40°C para temperatura inicial até a temperatura de 980°C, ficando por um período de 20 minutos em patamar, seguindo de têmpera.

Figura 12 – Representação Esquemática da Operação do Forno na Capacidade Máxima de Aquecimento Programado.



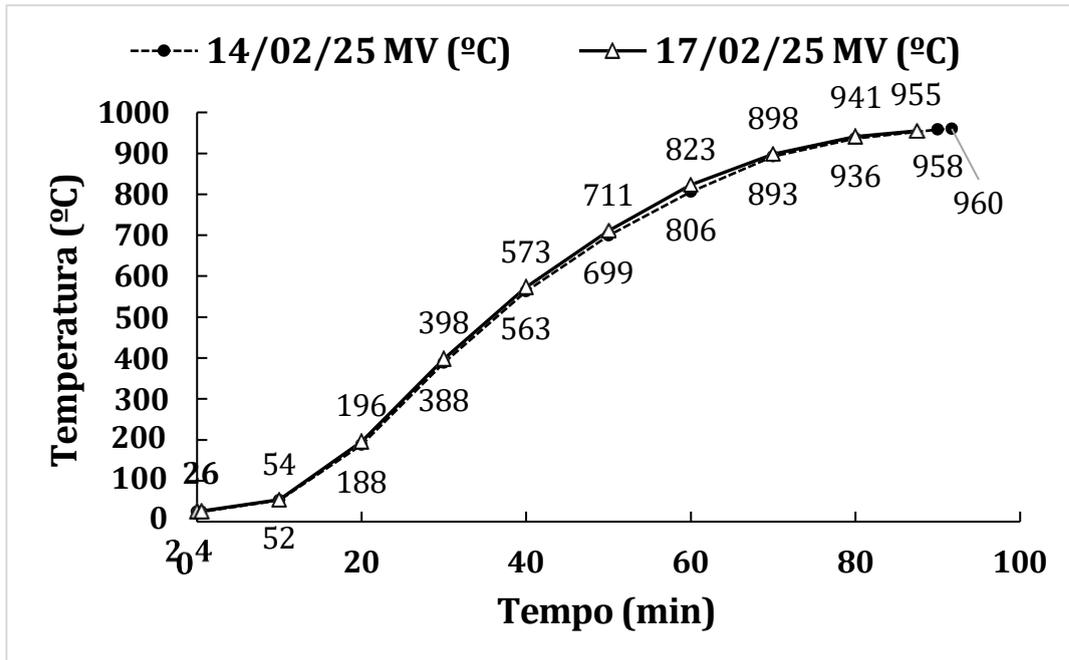
No controlador de segurança J200 a temperatura final escolhida foi de 1021°C, esta temperatura é maior que a temperatura esperada do controlador principal, justamente para assegurar que o forno realmente atingirá a temperatura de 980°C no controlador principal. O controlador principal e o de segurança possuem um display que indica dois valores: PV e SP. O valor PV representa a variável de processo controlada, ou seja, a temperatura. Já o valor SP indica o *setpoint*, que é o valor desejado para a variável do processo. O desvio máximo permitido entre PV e SP é definido por uma função de tolerância do programa, chamada Ptol (*program tolerance*). Caso o valor de Ptol seja excedido, o programa é suspenso até que o desvio retorne para dentro da faixa de tolerância. Para a simulação do forno em sua capacidade máxima,

foi utilizado uma variação tolerável de $\pm 20^{\circ}\text{C}$ (Ptol 20), conforme indicado no manual do fabricante.

O aquecimento do forno em vazio foi realizado em dois dias distintos com o objetivo de verificar a repetibilidade da curva de aquecimento sob a mesma programação, assegurando a confiabilidade na execução dos tratamentos térmicos de têmpera que seriam realizados posteriormente. Isto pode ser observado na Figura 13 que foi construído a partir dos dados da Tabela 6,

O MV é o valor mensurado de temperatura, ou seja, é a temperatura real dentro do forno captada por um termopar.

Figura 13 – Repetibilidade da curva de Aquecimento com forno em vazio e Ptol 20 na capacidade máxima de aquecimento programada em dias distintos.



Fonte: Próprio Autor.

Tabela 6 – Registros das temperaturas do forno em vazio Ptol 20 em dias distintos

	Dia 14/02/2025	Dia 17/02/2025
Tempo (min)	Temperatura MV (°C)	Temperatura MV (°C)
0	24	26
0,5	24	26
10	52	54
20	188	196
30	388	398
40	563	573
50	699	711
60	806	823
70	893	898
80	936	941
87,5	-	955
90	958	-
91,7	960	-

Fonte: Próprio autor.

É importante ressaltar que o aquecimento do forno em vazio levou 1h40min para atingir a temperatura programada, com isso já era possível fazer a rampa de aquecimento do forno. Foi observado que o controlador principal ao atingir a temperatura desejada desabilitou os sinalizadores, confirmando com um alarme que o forno já havia atingido o valor esperado, desligando o controlador principal automaticamente.

A Tabela 7 apresenta o registro das temperaturas dos controladores principal e de segurança obtidas na simulação de tratamento térmico de têmpera na condição máxima com o forno em vazio e em Ptol 20 e a sua curva de aquecimento, respectivamente.

Onde MV é temperatura real mensurada e captada pelo termopar na câmara do forno. SV é a temperatura desejada programada no controlador para que o forno atinja. A temperatura de segurança é o limite máximo de temperatura que o forno não pode ultrapassar, por motivos de segurança, com a função de proteger o equipamento, a amostra e o operador.

Tabela 7 – Registros das temperaturas do forno em vazio Ptol 20

Tempo (min)	Temperatura MV (°C)	Temperatura SP (°C)	Temperatura de Segurança (°C)
0	26	40	30
0,5	26	51	30
10	54	75	257
20	196	220	475
30	398	425	632
40	573	598	754
50	711	732	856
60	823	846	943
70	898	921	1018
80	941	964	1021
87,5	955	980	1023

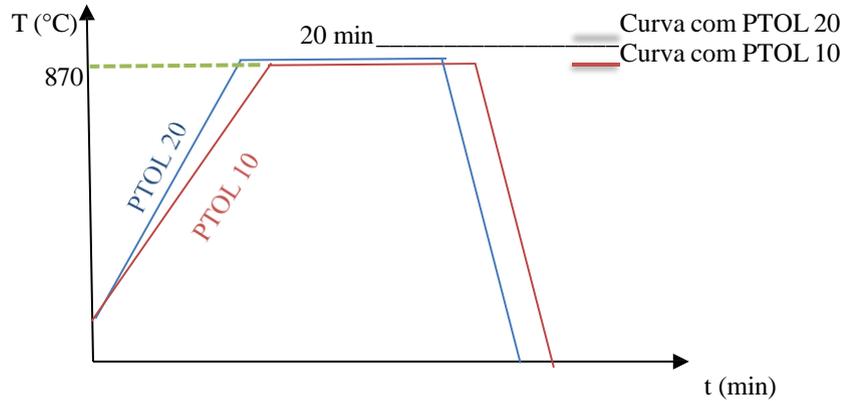
Fonte: Próprio autor.

3.2.2 Tratamento Térmico

A construção da curva de aquecimento do forno no tratamento térmico de têmpera aplicado no estudo foi realizada sob três condições distintas, também representas nos ciclos térmicos da Figura 14:

- a) Programação de aquecimento do forno com Ptol igual a 20 e a amostra no interior do forno.
- b) Programação de aquecimento do forno com Ptol igual a 10, amostra no interior do forno com carvão.
- c) Programação de aquecimento do forno com Ptol igual a 10, amostra no interior do forno sem carvão.

Figura 14 - Curva de Têmpera com forno na capacidade máxima de aquecimento em simulação com Ptol 10 e Ptol 20

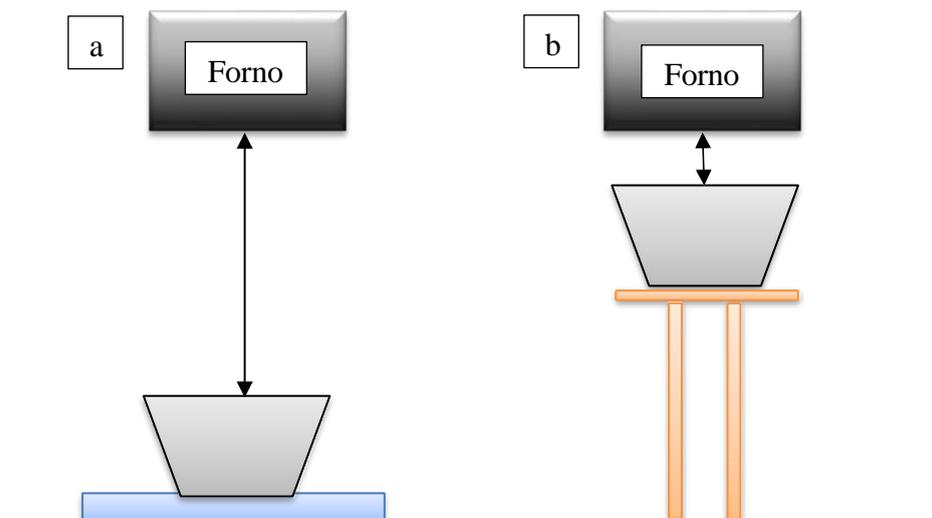


Fonte: Próprio Autor.

A programação com os parâmetros dos controladores do forno sob as três condições distintas: apresentado em vazio com potência máxima e aquecimento com Ptol 20 e Ptol 10 estão nos Apêndices B.

Para o tratamento térmico de têmpera foi utilizado um balde de aço galvanizado como reservatório de água para o resfriamento e padronizado o volume de 02 (dois) litros de água. a montagem deste reservatório foi posicionada em duas distâncias distintas, conforme a Figura 15.a e 15.b.

Figura 15 – Arranjo Configurado para realizar as têmperas: a) com Ptol 10, b) com Ptol 20



Fonte: Próprio Autor.

Com o intuito de verificar como diferentes condições influenciam o aquecimento da amostra, especialmente quanto à estabilidade da temperatura e tempo para atingir valores desejáveis, foram registrados os valores de temperatura e tempo correspondente para cada condição experimental aplicada no trabalho. Durante a atividade do forno foram registradas as temperaturas de 10 em 10 minutos, conforme Tabelas 8,9 e 10.

Tabela 8 – Dados do forno no aquecimento do CP 01 (Ptol 20)

Tempo (min)	Temperatura MV (°C)	Temperatura SP (°C)	Temperatura de Segurança (°C)
0	28	40	32
10	55	81	264
20	185	210	466
30	390	418	631
40	568	595	751
50	704	734	852
60	817	845	941
70	864	870	949
80	866	870	933
90	870	870	861

Fonte: Próprio autor.

Tabela 9 – Dados do forno no aquecimento do CP 02 (Ptol 10) com carvão

Tempo (min)	Temperatura MV (°C)	Temperatura SP (°C)	Temperatura de Segurança (°C)
0	25	40	27
10	53	67	248
20	189	206	467
30	402	415	629
40	576	588	749
50	707	720	848
60	813	824	931
70	863	870	942
80	868	870	924
85	870	870	920

Fonte: Próprio autor.

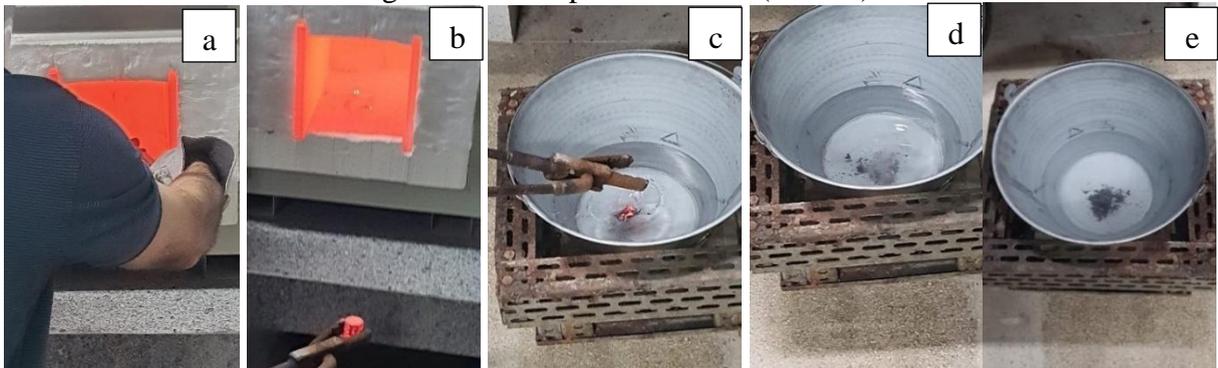
Tabela 10 – Dados do forno no aquecimento do CP 03 (Ptol 10) sem carvão

Tempo (min)	Temperatura MV (°C)	Temperatura SP (°C)	Temperatura de Segurança (°C)
0	25	40	27
10	57	67	263
20	200	217	480
30	403	413	637
40	575	588	756
50	708	724	851
60	812	824	932
70	865	870	941
80	866	870	925
85	870	870	920

Fonte: Próprio autor.

No tratamento térmico de têmpera, o CP1 foi exposto ao ar durante 3,5 segundos, correspondendo ao tempo de intervalo entre amostra sair do forno e a sua imersão na água, visto que o reservatório estava mais distante do forno, conforme a Figura 16.

Figura 16 – Têmpera do CP 01 (Ptol 20)



Fonte: Próprio autor.

No tratamento térmico do CP2 programado com o Ptol 10, foi incluindo no interior do forno um fragmento de carvão com o intuito de reduzir uma possível descarbonetação. Neste tratamento o reservatório com água foi colocado mais próximo do forno mufla, Figura 17, assim, o corpo de prova foi exposto ao ar por um tempo de 1,5 segundos. O CP3 o tratamento térmico foi programado semelhante ao do CP2, contudo sem a inclusão do fragmento de carvão e a amostra antes da têmpera ficou 1segundo exposta ao ar.

Figura 17 – Têmpera do CP 02 (com Ptol 10) com carvão

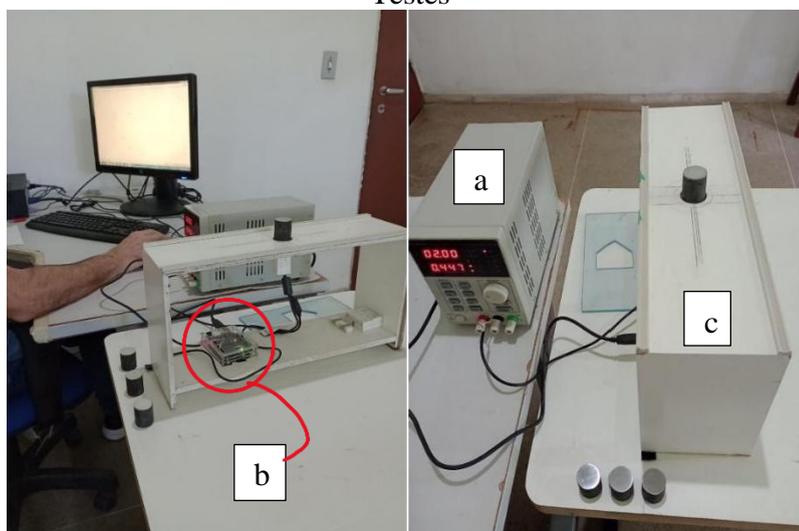


Fonte: Próprio autor.

3.2.3 Ensaio Magnético

O equipamento utilizado nos ensaios magnéticos foi desenvolvido no Laboratório de Tecnologia Térmica (LTT) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Ele é constituído por dois módulos principais: o módulo de emissão e o módulo de aquisição. A disposição dos equipamentos necessários para a execução dos ensaios pode ser devidamente visualizada conforme indicado na Figura 18.

Figura 18 – Configuração Experimental: (a) Gerador, (b) Placa de Aquisição e (c) Bancada de Testes



Fonte: Próprio autor

3.2.4 Ensaio de Dureza

O durômetro utilizado para o ensaio de dureza Rockwell foi o da marca Digimess, disponível no Laboratório de Tratamento Térmico (LTT) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), conforme ilustrado na Figura 19. Os procedimentos foram executados em conformidade com a norma ABNT NBR ISO 6508-1:2019. Para assegurar a confiabilidade dos resultados, a dureza foi medida em cinco pontos distintos em cada amostra. A força de pré-carga aplicada durante o ensaio foi de 10 kgf, enquanto as forças de carga foram de 100 kgf para durezas Rockwell B e 150 kgf para durezas Rockwell C.

Figura 19 – Durômetro DIGIMESS



Fonte: Próprio autor.

3.2.5 Preparação Metalográfica

A preparação metalográfica iniciou-se desde o recebimento da amostra, corte, torneamento, lixamento e polimento. Para o lixamento foram utilizadas a lixadeira do LTT e lixas de carboneto de silício 320, 400, 600 e 1200 *Mush* para remover imperfeições e deixá-las planas e lisas, esse processo deve ser feito sempre que alternar a lixa fazendo uma rotação de 90°.

No polimento foram utilizados nos panos pasta de diamante de 6, 3 e 1 μ m, e um reagente adequado para polimento de aços, com movimentos de rotação contrárias à politriz e sempre lubrificando as amostras e os panos a fim de deixar as superfícies altamente reflexivas, a politriz utilizada foi a do Laboratório de Materiais, conforme Figura 20. O equipamento é do fabricante Arotec, modelo PLF.

Figura 20 – Politriz Arotec



Fonte: Próprio Autor

Antes da captura de imagens foi realizado o ataque químico com de Nital 3% nas amostras, (que é a mistura de álcool com ácido nítrico) e serve para facilitar a visualização dos contornos de grãos e toda microestrutura. A duração de ataque foi de 5 segundos para cada corpo de prova.

3.2.6 Microscopia Óptica

O microscópio óptico (metalográfico) binocular com câmera acoplada utilizado pertence ao Laboratório de Materiais é do fabricante Zeiss, conforme a Figura 21.

Figura 21 - Microscópio óptico



Fonte: Próprio Autor.

A determinação da fração volumétrica nas fases presentes nas amostras foi realizada por meio do software ImageJ.

3.2.7 Modelagem Matemática

Determinação da Equação que Descreve a Curva de aquecimento do forno foi feito uma análise de regressão não linear, utilizando os modelos conforme a Tabela 11.

A seleção do modelo foi baseada na análise do ajuste de qualidade da regressão não-linear a partir do coeficiente de determinação (R^2), do coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), do critério de informação de Akaike (AIC) e do critério de informação Bayesiano (BIC).

Para a simulação dos modelos foram utilizados os softwares R4.4.3, RStudio e OriginPro 2023 para seleção do melhor modelo matemático e equação adequada nas conformidades da curva de aquecimento.

Tabela 11 – Modelos Estatísticos Estudados

Modelos Estatísticos	Equações
Exponencial1	$y \sim a / (1 + b * \exp(b - c * x))$
Exponencial2	$y \sim a * \exp(b * x)$
Michierlich	$y \sim a * (1 - \exp(c * b - c * x))$
Gompertz	$y \sim a * \exp(-\exp(b - c * x))$
Logístico	$y \sim a / (1 + \exp(b - c * x))$
Meloun_I	$y \sim a - b * \exp(-c * x)$
Meloun_II	$y \sim a - \exp(-b - c * x)$
Brody	$y \sim a * (1 - b * \exp(-c * x))$
VonBertalanffy	$y \sim a * (1 - b * \exp(-c * x))^3$
Michaelis_Menten	$y \sim (a * x) / (x + b)$
Geral	$y \sim a * x^b / (c^b + x^b)$

Fonte: Próprio Autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Curvas de Aquecimento

O registro das temperaturas de aquecimento medidas desde a temperatura inicial de tratamento térmico até a temperatura de máxima programada, para todas as situações estudadas estão resumidas na Tabela 12 e na Figura 22.

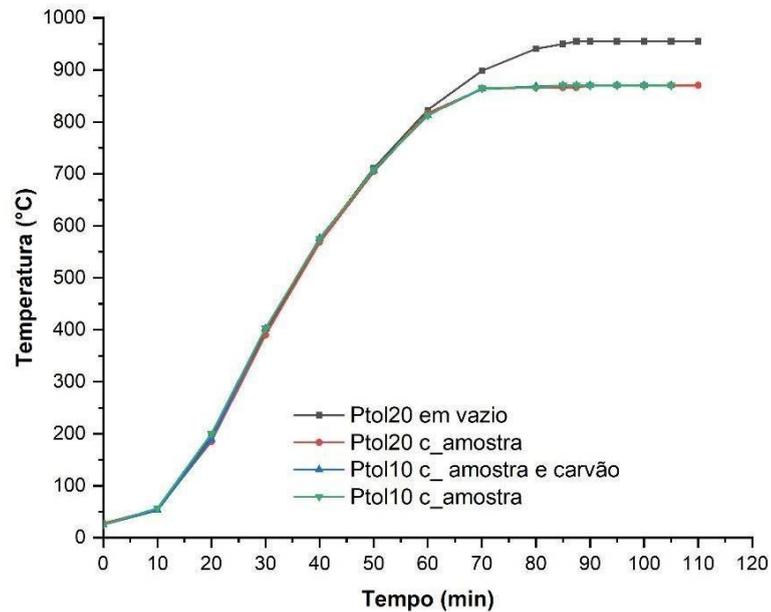
Tabela 12 – Comparação das Temperaturas nas situações de Ptol 20 e Ptol 10

Tempo (min)	Temperatura (°C)					
	Ptol 20			Ptol 10		
	em vazio	com amostra (CP1)	Desvio padrão	com amostra e carvão (CP2)	com amostra (CP3)	Desvio padrão
0	26	28	1.41	25	25	0.00
10	54	55	0.71	53	57	2.83
20	196	185	7.78	189	200	7.78
30	398	390	5.66	402	403	0.71
40	573	568	3.54	576	575	0.71
50	711	704	4.95	707	708	0.71
60	823	817	4.24	813	812	0.71
70	898	864	24.04	863	865	1.41
80	941	866	53.03	868	866	1.41
85	-	-	-	870	870	0.00
87.5	955	-	-	-	-	-
90	-	870	-	-	-	-
		Média	11.71		Média	1.63

(-): Não foi feito registo da temperatura

Fonte: Próprio Autor.

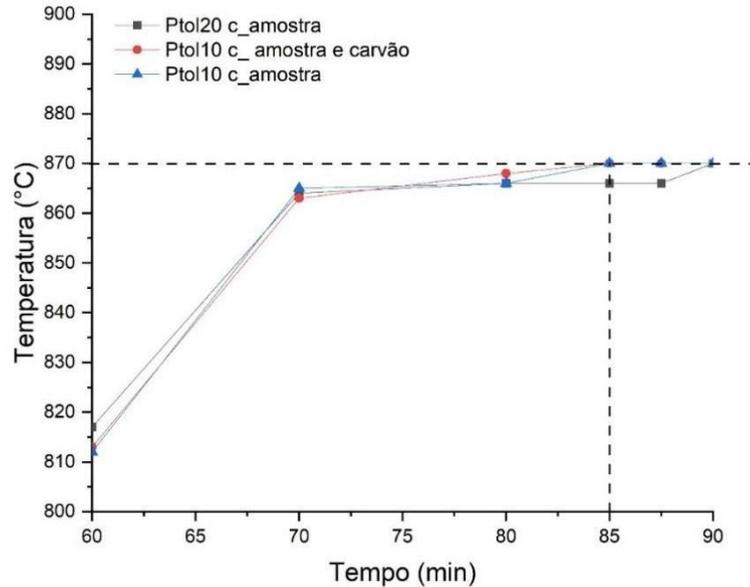
Figura 22 - Representação esquemática dos tratamentos térmicos realizados: a) Condições experimentais em comparação com a programação do forno em vazio e b) detalhamento da curva de aquecimento ao alcançar a temperatura de austenitização programada em função do tempo.



As curvas de aquecimento apresentaram comportamento semelhante até aproximadamente 60 minutos, indicando consistência no comportamento do forno em relação ao aquecimento entre as diferentes condições estudadas. Para as programações com amostras no interior do forno, observou-se uma estabilização da temperatura em torno de 870 °C entre 70 e 90 minutos, evidenciando a efetividade tanto da programação *ptol 20* quanto da *ptol 10* em atingir a faixa adequada para a austenitização. No entanto, a condição com amostra e carvão vegetal sob *ptol 10* apresentou menor oscilação térmica no patamar final, o que sugere maior estabilidade e homogeneidade térmica, característica desejável em tratamentos térmicos que exigem controle microestrutural mais rigoroso.

A análise detalhada das curvas de aquecimento na faixa de 870 °C, apresentada na Figura 23, permite identificar qual condição ensaiada atingiu essa temperatura em menor tempo.

Figura 23 – Estabilização da Temperatura de Austenitização (870°C) do aço AISI 4340 nas programações Ptol10 e Ptol20, sob três diferentes condições com amostra.4340.



Fonte: Próprio Autor.

Conforme apresentado na Tabela 12 e Figura 23, a programação do controlador principal com *ptol 10* atingiu a temperatura de 870 °C em 85 minutos, tempo inferior ao registrado com a programação *ptol 20*, que demandou 90 minutos para alcançar a mesma temperatura. Além disso, as amostras tratadas sob a condição de aquecimento com *ptol 10* apresentaram o menor tempo total de tratamento térmico de têmpera, totalizando 111 minutos (1 hora e 51 minutos), conforme evidenciado na Figura 22. Essa configuração, além de reduzir o tempo de processamento, demonstra maior eficiência térmica, otimizando o ciclo de tratamento sem comprometer a temperatura final requerida.

A curva de aquecimento com forno em vazio testada para os modelos simulados pelo software RStudio estão nos Apêndice B e C.

4.1.1 Seleção do modelo de regressão não linear para a curva de aquecimento Ptol20

Observou-se que as temperaturas registradas no aquecimento do forno em vazio e com a amostra em seu interior e programação com o Ptol 20 não alterou o tempo e as temperaturas relacionadas entre eles.

Os valores obtidos para os parâmetros estatísticos dos modelos de regressão não-

linear testados para o aquecimento do forno em vazio estão apresentados na Tabela 13.

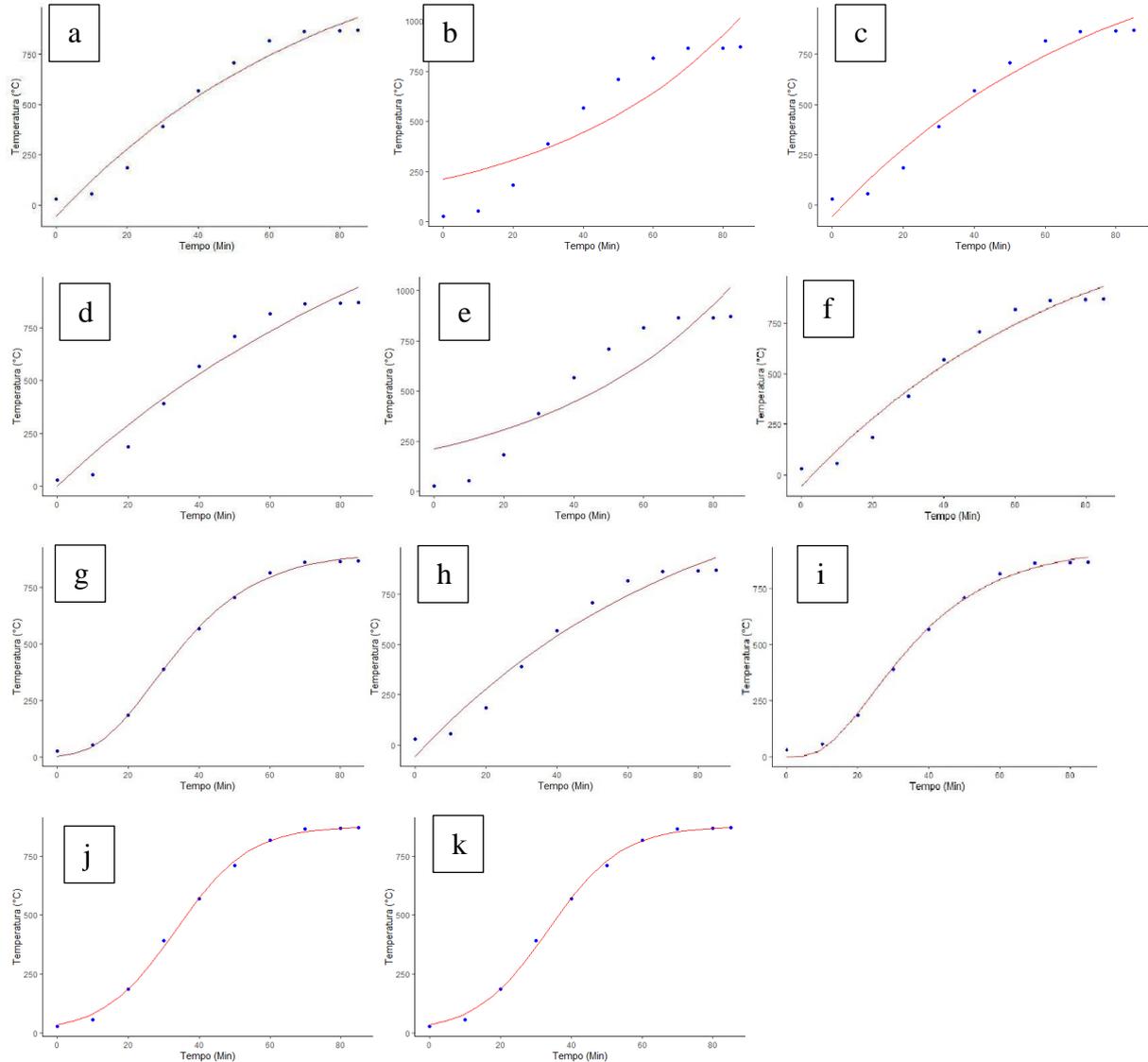
Tabela 13 – Modelos Simulados pelo Software RStudio para Curvas de Aquecimento com Ptol 20, amostra CP1

Modelos Estatísticos	Equações	Parâmetros			
		R ²	R ² Ajust.	AIC	BIC
Exponencial1	$y \sim a / (1 + b * \exp(b - c * x))$	0.9964	0.9947	98.1698	99.3802
Exponencial2	$y \sim a * \exp(b * x)$	0.8498	0.8069	133.0033	133.9110
Michierlich	$y \sim a * (1 - \exp(c * b - c * x))$	0.9771	0.9657	115.6239	116.8342
Gompertz	$y \sim a * \exp(-\exp(b - c * x))$	0.9995	0.9992	78.1350	79.3453
Logístico	$y \sim a / (1 + \exp(b - c * x))$	0.9964	0.9947	98.1698	99.3802
Meloun_I	$y \sim a - b * \exp(-c * x)$	0.9771	0.9657	115.6239	116.8342
Meloun_II	$y \sim a - \exp(-b - c * x)$	0.9771	0.9657	115.6239	116.8342
Brody	$y \sim a * (1 - b * \exp(-c * x))$	0.9771	0.9657	115.6239	116.8342
VonBertalanff	$y \sim a * (1 - b * \exp(-c * x))^3$	0.9994	0.9992	82.2638	83.4741
Michaelis_Menten	$y \sim (a * x) / (x + b)$	0.9745	0.9673	115.4981	116.4058
Geral	$y \sim a * x^b / (c^b + x^b)$	0.9994	0.9991	83.1905	84.4008

Fonte: Próprio autor.

Os parâmetros fornecidos nas Tabelas 11 e 13 são resultados de modelos estatísticos que foram ajustados para descrever o comportamento do aquecimento de um forno mufla. Cada linha da Tabela apresenta uma equação matemática que descreve o comportamento do processo de aquecimento com base em diferentes tipos de modelos (como exponenciais, logísticos, de Gompertz, entre outros). As curvas de aquecimento com Ptol 20 testada para os modelos simulados pelo software RStudio estão na Figura 24.

Figura 24 - Modelos simulados pelo software RStudio para a curva de aquecimento com Ptol 20, amostra CP1: a) Exponencial1, b) Exponencial2, c) Michierlich, d) Gompertz, e) Logístico, f) Meloun_I, g) Meloun_II, h) Brody, i) VonBertalanffy, j) Michaelis_Menten, k) Geral



Fonte: Próprio Autor.

Conforme os resultados obtidos por meio da simulação no software RStudio, o modelo de Gompertz apresentou o melhor ajuste na regressão, demonstrando maior precisão na descrição da curva de aquecimento. Os coeficientes de determinação $R^2=0,9995$ e $R^2_{ajust} = 0,9992$ foram os mais elevados entre os modelos avaliados. Além disso, os valores dos critérios de informação AIC (78,1350) e BIC (79,3453) foram os mais baixos, o que reforça a superioridade estatística do modelo frente às demais opções simuladas. A análise de variância (ANOVA) comparando a variação devida à regressão não linear com a variação devida ao resíduo foi realizada e o seu resultado está na Tabela 14.

Tabela 14 – ANOVA dos modelos de regressão não linear para a curva de aquecimento Ptol20, amostra (CP1).

	GL	SQ	QM	Fc	pValor
Regressão	2	1206787.696	603393.848	6490.0599	0
Resíduos	7	650.804	92.972	-	-
Total	9	207438.500	-	-	-

Fonte: Próprio autor.

Tomando como base a Tabela 14 e valor GL = 2, pode-se concluir que existe pelo menos dois modelos de regressão não linear, com desempenho significativamente diferentes ao avaliar o valor-p = 0,00. O valor-p associado ao teste F indica a probabilidade de que a variabilidade explicada pelo modelo seja devido ao acaso. Se o valor-p for menor que um nível de significância (geralmente 0,05), o modelo é considerado significativo; como o p-Valor foi igual a zero (p-valor = 0), indica que o modelo Gompertz é altamente significativo. Em termos práticos, isso significa que a chance de que a variação explicada pelo modelo selecionado seja devido ao acaso é extremamente pequena. Portanto, a hipótese nula (de que o modelo não tem efeito significativo) é rejeitada.

Os valores estimados dos coeficientes da equação do modelo Gompertz selecionado estão na Tabela 15.

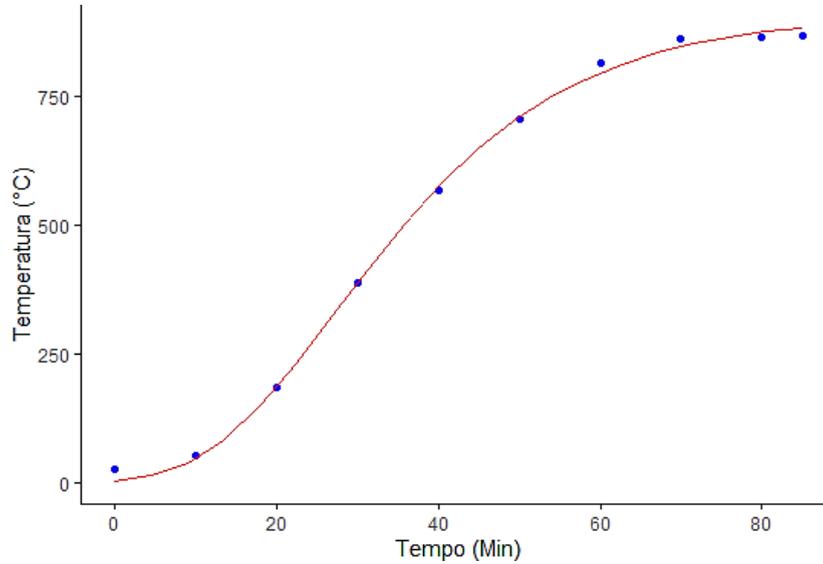
Tabela 15 – Valores Estimados dos Coeficientes ajustados nas equações

Paraâmetros	Valor			
	Estimado	Erro Std.	Valor t	Pr(> t)
A	1.761e+03	5.705e+02	3.087	0.0176
B	3.075e+00	2.504e+00	1.228	0.2591
C	1.012e-02	4.822e-03	2.098	0.0741

Fonte: Próprio autor.

Os coeficientes a, b e c estimados possuem grande correlação e relevância dos dados simulados em relação aos dados experimentais, ou seja, são bem próximos do real. Deste modo, o gráfico da curva de aquecimento simulado do Modelo Gompertz detalhado e os dados experimentais são similares, conforme Figura 25.

Figura 25 - Modelo Gompertz gerado pelo software RStudio



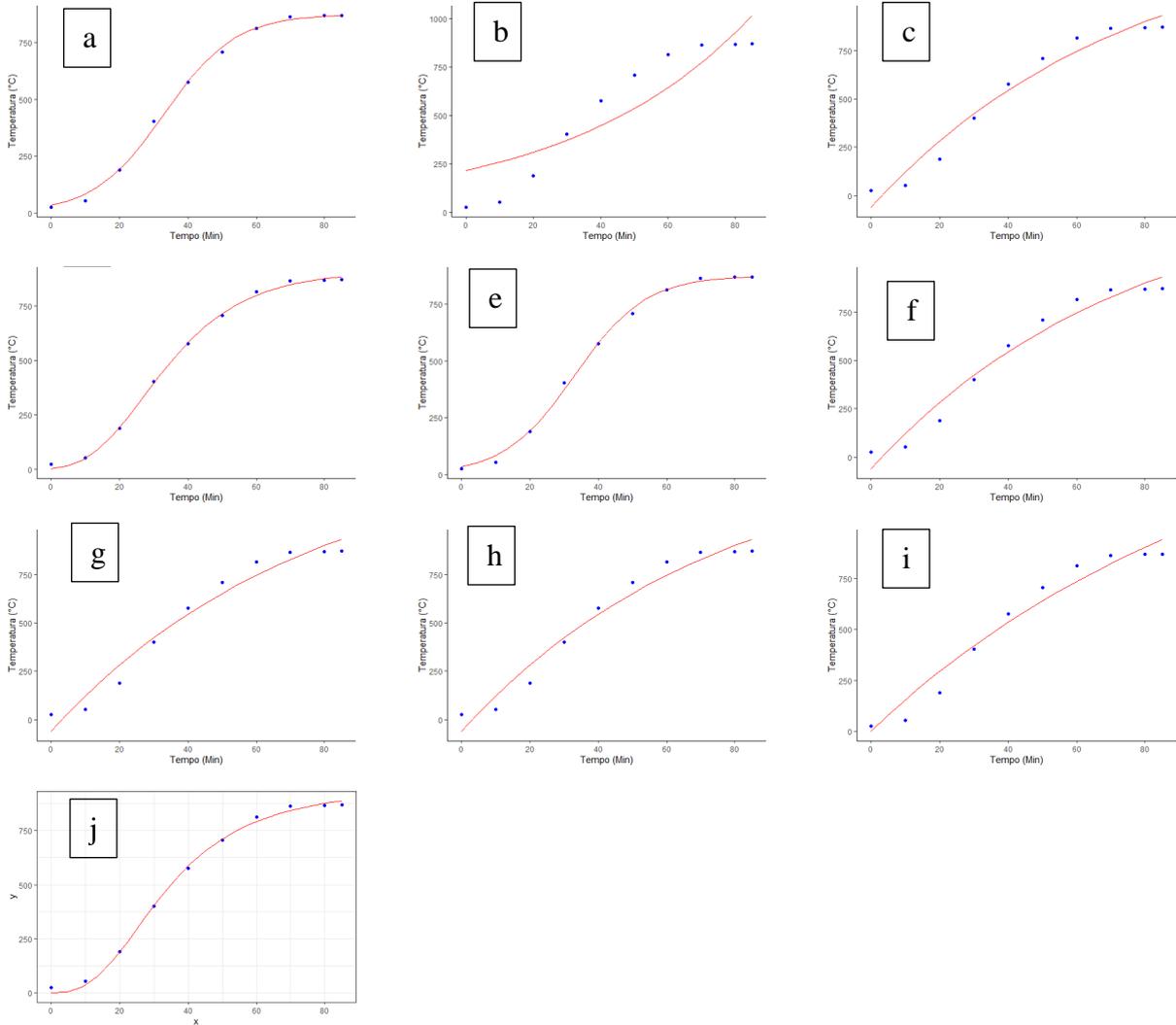
Fonte: Próprio autor.

4.1.2 Seleção do modelo de regressão não linear para a curva de aquecimento Ptol 10

4.1.2.1 Regressão não linear para a curva de aquecimento para CP2

Assim como nos modelos simulados com o Ptol 20, nos modelos observados com o Ptol 10, O Modelo Gompertz obteve o melhor resultado, obedecendo a regra dos valores dos parâmetros R^2 e R^2 ajustado serem os maiores possíveis e os valores dos parâmetros AIC e BIC serem os menores possíveis comparados aos outros modelos, conforme a Tabela 15. As curvas de aquecimento com Ptol 20 testada para os modelos simulados pelo software RStudio estão na Figura 26.

Figura 26 - Modelos simulados pelo software RStudio para a curva de aquecimento com Ptol 10, amostra CP2: a) Exponencial1, b) Exponencial2, c) Michierlich, d) Gompertz, e) Logístico, f) Meloun_I, g) Meloun_II, h) Brody, i) Michaelis_Menten, j) Geral



Fonte: Próprio Autor.

Tabela 15 – Modelos Simulados pelo Software RStudio para Curvas de Aquecimento com Ptol 10

Parâmetros					
Modelos	Equações	R2	R2 Ajust.	AIC	BIC
Exponencial1	$y \sim a / (1 + b * \exp(b - c * x))$	0.9976	0.9965	92.5772	93.7876
Exponencial2	$y \sim a * \exp(b * x)$	0.8207	0.7695	133.4854	134.3931
Michierlich	$y \sim a * (1 - \exp(c * b - c * x))$	0.9665	0.9497	118.2243	119.4346
Gompertz	$y \sim a * \exp(-\exp(b - c * x))$	0.9990	0.9984	84.7708	85.9812
Logístico	$y \sim a / (1 + \exp(b - c * x))$	0.9976	0.9965	92.5772	93.7876
Meloun_I	$y \sim a - b * \exp(-c * x)$	0.9665	0.9497	118.2243	119.4346
Meloun_II	$y \sim a - \exp(-b - c * x)$	0.9665	0.9497	118.2243	119.4346
Brody	$y \sim a * (1 - b * \exp(-c * x))$	0.9665	0.9497	118.2243	119.4346
VonBertalanffy	$y \sim a * (1 - b * \exp(-c * x))^3$	0.9981	0.9971	91.5498	92.7602
Michaelis_Menten	$y \sim (a * x) / (x + b)$	0.9625	0.9517	118.0396	118.9474
Geral	$y \sim a * x^b / (c^b + x^b)$	0.9984	0.9984	90.8383	92.0486

Fonte: Próprio autor.

Tabela 16– Valores de significância estatística expressiva

	GL	SQ	QM	Fc	pValor
Regressão	2	1067786.711	533893.35569	2957.41643	0
Resíduos	7	1263.689	180.52695		
Total	9	1069050.400			

Fonte: Próprio autor.

Observa-se na Tabela 16 também uma significância estatística expressiva, com p-valor igual a 0 e $F_c = 2957,41643$. Apesar de a soma dos quadrados da regressão ($SQ = 1067786,711$) ser ligeiramente inferior à apresentada na Tabela 13.

Tabela 17 – Valores Estimados dos Coeficientes ajustados nas equações

Valor				
Parâmetros	Estimado	Erro Std.	Valor t	Pr(> t)
A	9.063e+02	1.160e+01	78.13	1.48e-11
B	1.686e+00	7.560e-02	22.31	9.20e-08
C	6.258e-02	2.856e-03	21.91	1.04e-07

Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 17 obteve-se um modelo com coeficientes altamente significativos (todos com $p < 0,00001$), menor erro padrão e maior valor t, sugerindo melhor controle térmico e reprodutibilidade dos dados experimentais.

4.1.2.2 Regressão não linear para a curva de aquecimento para CP3

Na tabela 18 está o resumo geral do modelo de regressão não linear selecionado para descrever a curva de aquecimento do forno conforme as condições experimentais estudadas. O modelo de regressão não linear Gompertz obteve os melhores resultados da qualidade de ajuste de regressão (R^2 , R^2_{aj} , AIC e BIC) para todas as condições experimentais.

Tabela 18 – Modelo de regressão não linear selecionado para cada condição experimental de aquecimento aplicado no tratamento térmico de têmpera do aço AISI 4340.

Amostra	Condição experimental de Aquecimento	Modelo	Equação
Sem amostra	Ptol 20 com forno vazio	Gompertz	$y = 1003 - 1,536 * \exp(-0,05285 * x)$
CP1	Ptol 20 com amostra	Gompertz	$y = 909,4 - 1,700 * \exp(-0,06218 * x)$
CP2	Ptol 10 com amostra e carvão	Gompertz	$y = 906,3 - 1,686 * \exp(-0,06258 * x)$
CP3	Ptol 10 com amostra	Gompertz	$y = 906,3 - 1,686 * \exp(-0,06258 * x)$

Fonte: Próprio Autor.

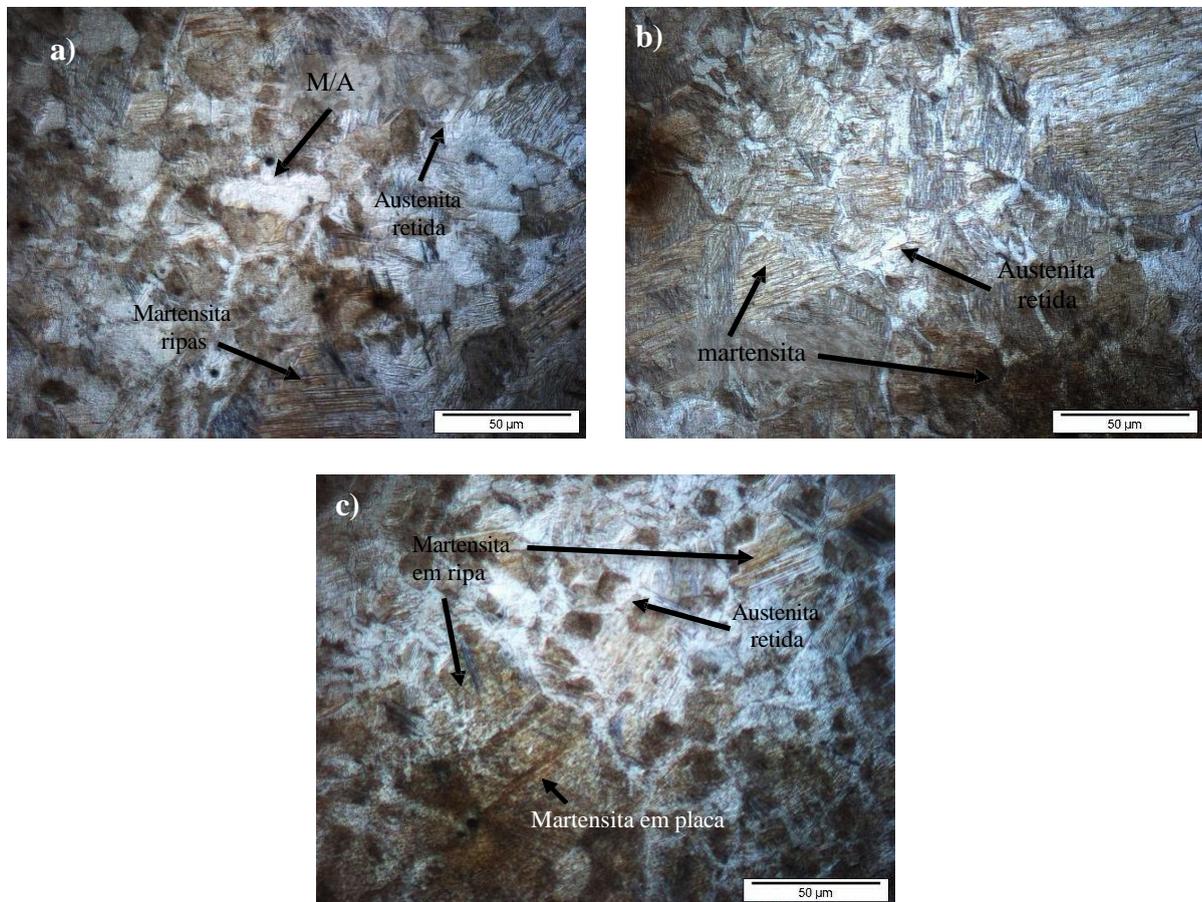
A eficiência do modelo de Gompertz se justifica por sua capacidade de representar curvas com comportamento sigmoidal, característica típica de processos térmicos em que o aquecimento ocorre inicialmente de forma lenta, acelera em seguida e, por fim, tende à estabilização ao se aproximar da temperatura de equilíbrio. Esse comportamento é coerente com o perfil observado no aquecimento do forno, tornando o modelo particularmente adequado para esse tipo de análise.

Observa-se que a equação obtida para a curva de aquecimento das amostras CP2 (Ptol 10 com amostra e carvão) e CP3 (Ptol com amostra) é idêntica, indicando que a condição experimental aplicada não influenciou a taxa de aquecimento. O comportamento térmico, em função da temperatura e do tempo, apresentou grande similaridade entre as estas amostras, conforme evidenciado na Tabela 11, com desvio padrão médio entre elas de apenas 1,6 °C/min.

4.2 Caracterizações Microestruturais

As microestruturas resultantes do tratamento térmico de têmpera da amostra CP1 está representada na Figura 27. São destacadas as regiões próxima à borda da superfície das amostras, região intermediária e região central.

Figura 27 – Seção transversal do CP1: a) região próxima à borda da amostra, b) região intermediária e c) centro da amostra.



Fonte: Próprio autor.

Percebe-se a formação de martensita e a presença de austenita retida (cor branca) em toda a região da superfície do corpo de prova, temperado em água, submetido ao aquecimento com Ptol 20. A têmpera sob a condição aplicada de tratamento térmico resultou na presença de martensita em ripa e martensita em placa. Estas morfologias podem estar presentes no material. De acordo com a ASM (1985), nos aços de médio carbono, embora a principal forma de martensita seja a martensita em ripas, também pode ser detectada alguma martensita em placas. A fração volumétrica das fases no CP1 estão na Tabela 19.

Tabela 19 – Fração volumétrica dos microconstituintes presentes na amostra CP1.

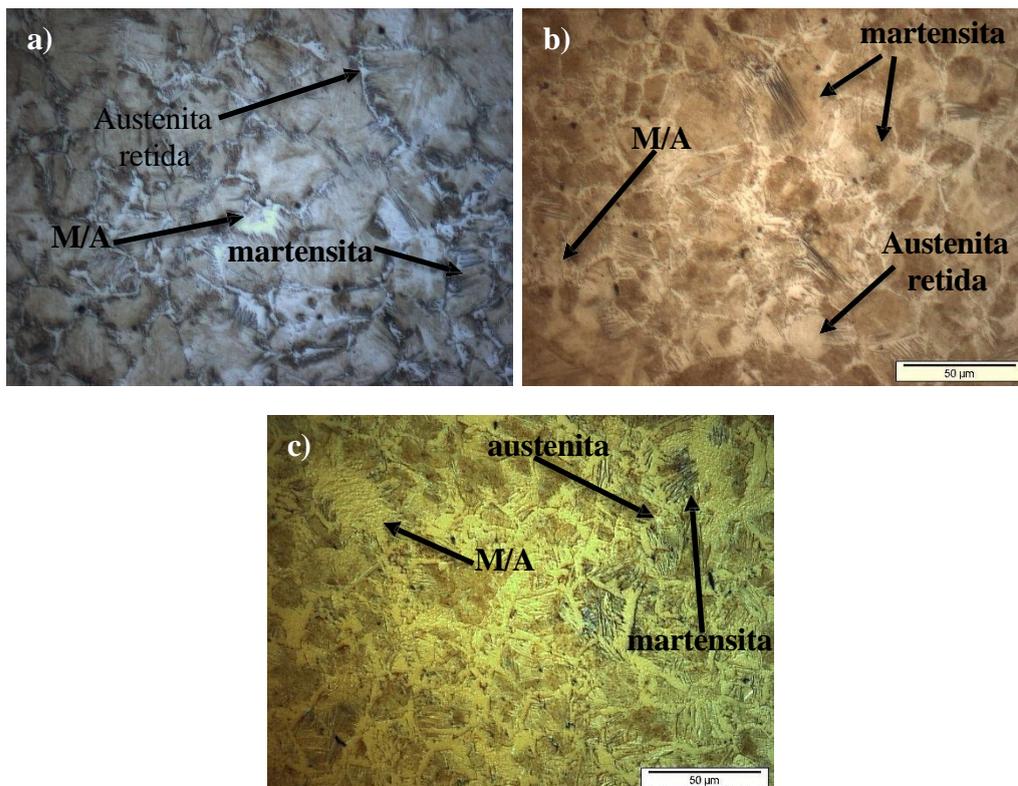
Ptol 20	Fração de Fase (%)		
Amostra	Austenita retida	Inclusão	Martensita
CP1 borda	40,996	0,57	59,004
CP1 intermediária	39,231	0,644	60,769
CP1 centro	41,158		58,842
Média	40,452	0,404	59,538

Fonte: Próprio autor.

A fração média de martensita presente foi de 59,538%, enquanto a de austenita retida foi de 40,462%, com variação da quantidade de fases presentes entre a região próxima à borda e o centro de 1,07% para os dois microconstituintes.

As microestruturas resultantes do tratamento térmico de têmpera da amostra CP2 está representada na Figura 28. São destacadas as regiões próxima à borda da superfície das amostras, região intermediária e região central.

Figura 28 – Seção transversal do CP2: a) região próxima à borda da amostra, b) região intermediária e c) centro da amostra



Fonte: Próprio autor.

Percebe-se a presença de austenita retida (nas partes mais claras) e martensita em toda a região da superfície do corpo de prova, principalmente nas partes mais escuras, temperado em água, submetido ao aquecimento com Ptol 10. A fração volumétrica das fases no CP2 estão na Tabela 20.

Tabela 20 – Seção transversal do CP2 a) região próxima à borda da amostra, b) região intermediária e c) centro da amostra.

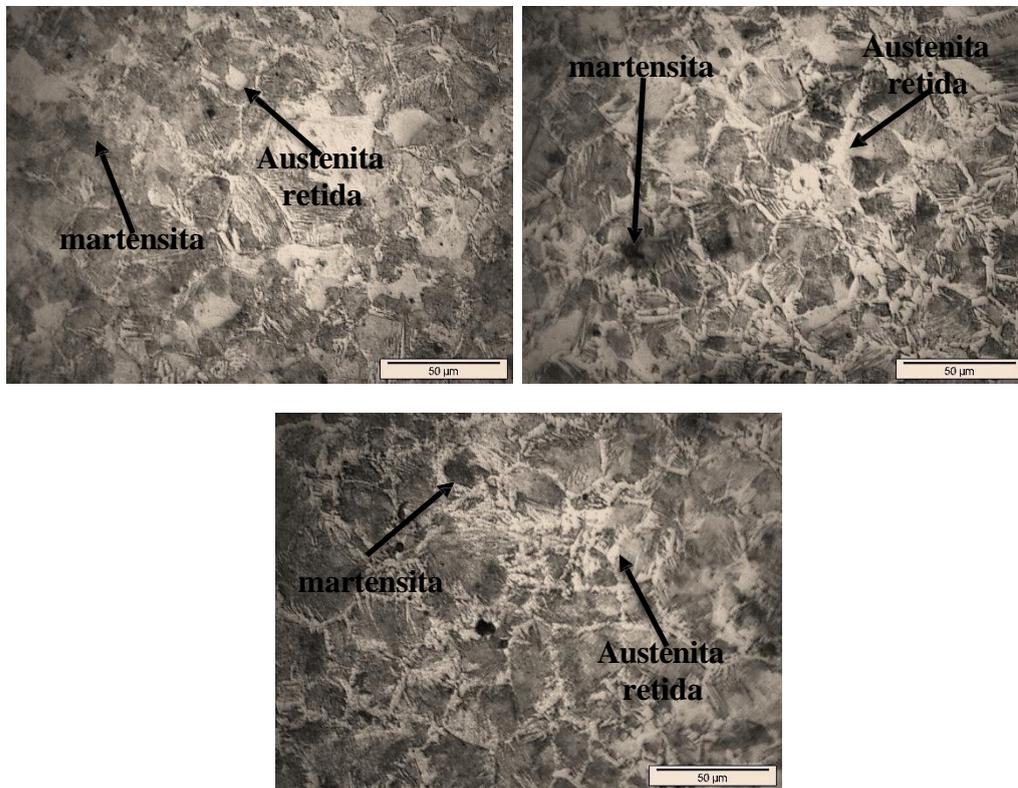
Ptol 10 com carvão	Fração de Fase (%)	
	Amostra	Austenita retida
CP2 borda	29,223	70,777
CP2 intermediária	42,721	57,279
CP2 centro	35,636	64,364
Média	35,860	64,140

Fonte: Próprio Autor.

A análise das frações de fase nas diferentes regiões da amostra CP2 indica variações na microestrutura ao longo da seção transversal. Na região da borda, observa-se a menor quantidade de austenita retida (29,22%) e a maior fração de martensita (70,78%), o que pode estar relacionado à maior taxa de resfriamento nessa região, favorecendo a transformação martensítica.

As microestruturas resultantes do tratamento térmicos de têmpera da amostra CP3 está representada na Figura 29. São destacas as regiões próxima à borda da superfície das amostras, região intermediária e região central.

Figura 29 – Seção transversal do CP3: a) região próxima à borda da amostra, b) região intermediária e c) centro da amostra.



Fonte: Próprio Autor

Observa-se a presença de austenita retida, identificada pelas regiões mais claras, e martensita, predominante nas áreas mais escuras, distribuídas ao longo de toda a superfície do corpo de prova. A amostra foi temperada em água após aquecimento sob a programação Ptol 10. As frações volumétricas das fases presentes no CP3 estão apresentadas na Tabela 21.

Tabela 21 – Seção transversal do CP3: a) região próxima à borda da amostra, b) região intermediária e c) centro da amostra.

Ptol 10	Fração de Fase (%)	
	Austenita Retida	Martensita
Amostra		
CP3 borda	36,630	63,370
CP3 intermediária	47,161	52,839
CP3 centro	43,987	56,013
Média	42,593	57,407

Fonte: Próprio Autor.

A distribuição de fases nas diferentes regiões da amostra CP3 revela uma variação significativa na quantidade de austenita retida e martensita, indicando influência da posição e, possivelmente, da taxa de resfriamento local. Na região da borda, observou-se a menor fração de austenita retida (36,63%) e a maior quantidade de martensita (63,37%), comportamento esperado para regiões que sofrem resfriamento mais intenso. Por sua vez, a região intermediária apresentou a maior proporção de austenita retida (47,16%) e a menor fração de martensita (52,84%), o que sugere um resfriamento mais lento, reduzindo a conversão total em martensita. A região central apresentou valores intermediários, com 43,99% de austenita retida e 56,01% de martensita, condizente com o gradiente térmico interno da amostra.

A Tabela 22 contém o resumo dos valores de fração média de fases apresentadas nas amostras temperadas nas condições distintas.

Tabela 22 – Fração de fase média presente nas amostras temperadas

Amostra	Fração de fase média (%)	
	austenita retida	Martensita
CP1	40.5	59.5
CP2	35.9	64.1
CP3	42.6	57.4
Média	39.6	60.4

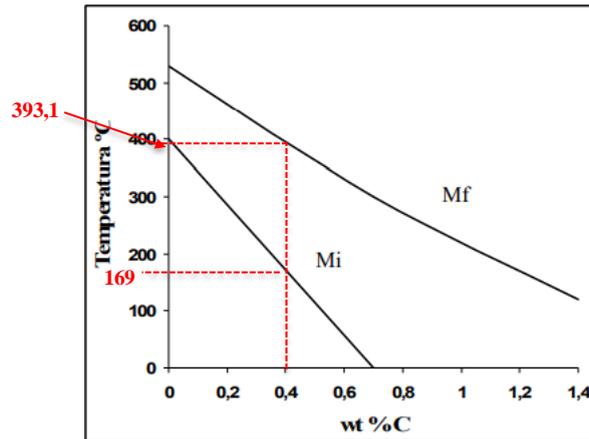
Fonte: Próprio Autor.

A análise da fração de fases, com base nos valores médios percentuais obtidos para cada corpo de prova, Tabela 22, indicou que a amostra CP3 apresentou a maior quantidade de austenita retida. A austenita retida pode exercer influência significativa sobre as propriedades mecânicas e a resistência à corrosão do material, contribuindo para o aumento da ductilidade e da tenacidade. Por outro lado, a presença excessiva de austenita retida pode, em determinadas condições, ocasionar a redução da dureza e da resistência mecânica, o que pode ser indesejável em algumas aplicações. Nesse contexto, embora a CP3 contenha uma quantidade significativa de martensita, a média percentual dessa fase foi de apenas 57%, inferior aos valores observados nas amostras CP1 (59%) e CP2 (64%). Dessa forma, é esperado que a CP3 apresente menor dureza em relação às demais, em razão da maior proporção de austenita retida em sua microestrutura.

A presença de austenita retida pode ser explicada pela quantidade de carbono presente na liga, pois a sua quantidade na liga influencia nas temperaturas de início (Mi) e fim (Mf) de formação de martensita. Para compreender este efeito foi feito uma avaliação por meio de sobreposição, do teor de carbono do aço AISI 4340 sobre o gráfico de influência de carbono

na transformação martensítica estudada por Honeycombe e Bhadeshia (1995), conforme a Figura 30.

Figura 30 - Efeito do teor de carbono na transformação da austenita em martensita



Fonte: Adaptado de Honeycombe e Bhadeshia (1995).

No aço AISI 4340, o volume de austenita foi de 39,6% presente na temperatura ambiente. Para que essa austenita transforme-se em martensita, é necessário abaixar a temperatura da amostra, na têmpera, de 870°C para abaixo de 169°C. de maneira a promover um resfriamento brusco até à temperatura ambiente.

4.2 Ensaio de Dureza

As medidas de dureza realizada nos corpos de prova temperados estão na Tabela 23.

Tabela 23 – Dureza Média do aço AISI 4340

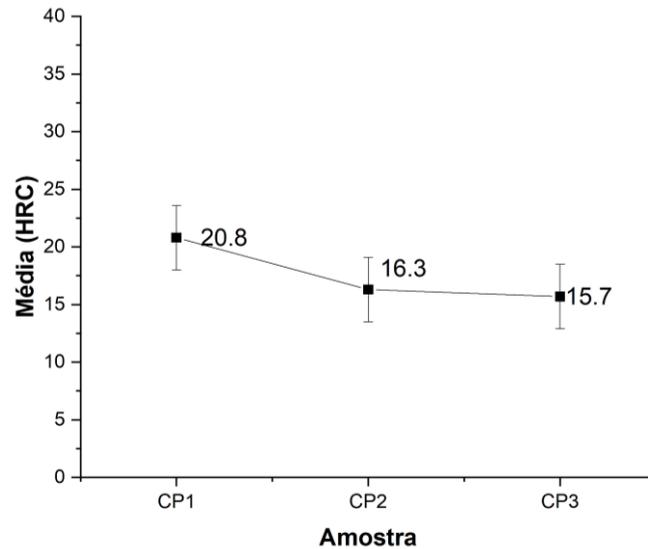
Amostras	Dureza (HRC)							Média	Desvio padrão
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Medida 6	Medida 7		
CP1	12.5	21	25.5	19	12.5	26	29	20.8	6.6
CP2	12.5	7	12	16.5	11	18	37	16.3	9.8
CP3	12	13	7	13	10	27	28	15.7	8.3

Fonte: Próprio autor.

O corpo de prova 01 apresentou a maior dureza, com 20,8 HRC e um desvio padrão de 6,6. Já os corpos de prova 02 e 03 apresentaram valores médios de dureza próximos, 16,3

HRC e 15,7 HRC, respectivamente. A dureza da amostra CP2 teve maior variação nos resultados comparado aos demais corpos de prova.

Figura 31 –Dureza média dos corpos de prova.



Fonte: Próprio autor.

As durezas medidas nos três corpos de prova tiveram valor inferior ao recomendado, dureza mínima de 54 HRC e máxima de 59 HRC, para o aço AISI 4340 temperado. O valor da dureza inferior ao recomendado pode ter sido influenciado pela quantidade de austenita retida presente nas amostras, reduzindo significativamente o valor da dureza esperada. A amostra CP3 apresentou menor valor de dureza quando comparado as outras amostras. Vale ressaltar que nesta amostra, CP3, a quantidade de austenita retida foi maior do que a CP1 e CP2.

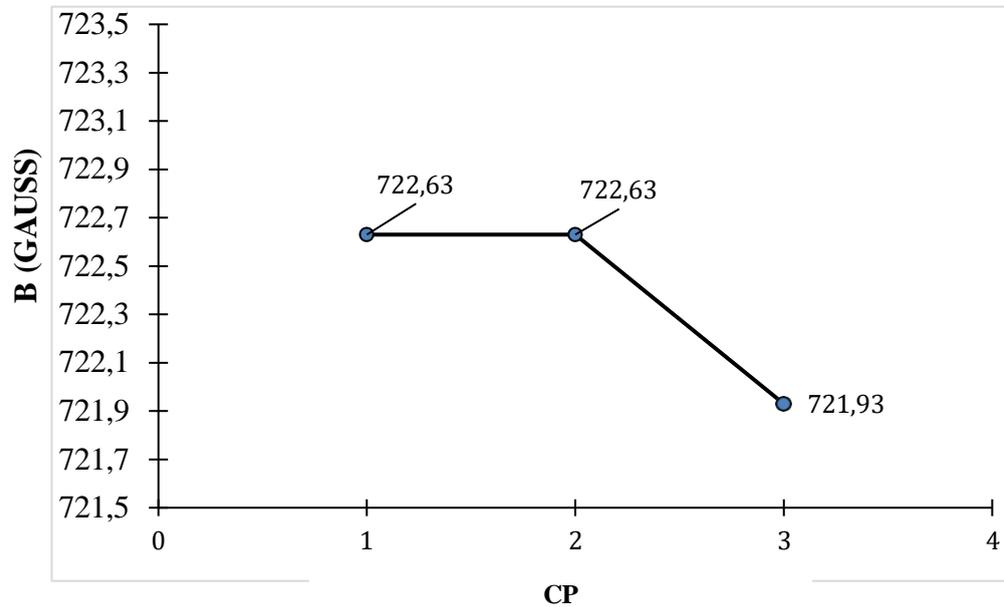
4.3 Ensaio Magnético

O sensor Hall mede a indução magnética (campo magnético), expressa aqui em Gauss (1 Tesla = 10.000 Gauss). Esse campo é influenciado por:

- Propriedades magnéticas do material.
- Presença de discontinuidades (trincas, inclusões, etc.).
- Estrutura interna (microestrutura).
- Grau de endurecimento do material (que afeta a permeabilidade magnética).

A figura com o resultado do ensaio magnético com o sensor Hall está na Figura 32.

Figura 32 – Gráfico De Análise Magnética por Sensor Hall



Fonte: Próprio autor.

Os resultados do ensaio magnético para os três corpos de prova mostram uma notável estabilidade nos valores de indução magnética B (em Gauss), com baixa dispersão entre as amostras:

Os corpos de prova 1 e 2 apresentaram o mesmo valor de 722,63 Gauss, com desvios padrão muito próximos (0,482 e 0,486, respectivamente). O corpo de prova 3 apresentou um valor ligeiramente inferior, 721,93 Gauss, e desvio padrão (0,486), mostrando ser magneticamente mais duros do que as amostras CP1 e CP2.

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste estudo confirmam o alcance dos objetivos propostos, especialmente no que se refere à programação do forno para os tratamentos térmicos de têmpera. A análise das curvas de aquecimento evidenciou que a configuração com ptol 10 atingiu a temperatura de 870 °C em 85 minutos, superando a eficiência da programação ptol 20, que demandou 90 minutos para o mesmo patamar térmico.

A repetibilidade das curvas de aquecimento em vazio, realizada em dias distintos, assegurou a confiabilidade dos tratamentos subsequentes. A modelagem matemática, por meio do modelo de Gompertz, demonstrou elevada precisão na descrição do comportamento térmico, com coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,999, qualidade nos ajustes com relação a R^2_{ajust} , AIC e BIC caracterizando adequadamente o perfil sigmoidal do processo de aquecimento.

Em relação às propriedades microestruturais, a amostra CP3 apresentou a maior fração de austenita retida e a menor porcentagem de martensita (57%), em comparação às amostras CP1 (59%) e CP2 (64%). Essa composição resultou em menor dureza para a CP3, evidenciando a influência da austenita retida nas propriedades mecânicas do aço AISI 4340 temperado.

A amostra CP3 apresentou um valor médio de magnetização de 721,93 Gauss, com desvio padrão de 0,486, indicando uma maior resistência à magnetização em comparação às amostras CP1 e CP2.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Realizar estudo com aplicação de aquecimento em várias taxas de aquecimento para analisar o comportamento do aquecimento e influência na microestrutura do aço AISI 4340 austenitizado.

REFERÊNCIAS

- ASM INTERNATIONAL. *ASM Handbook, Volume 4: Heat Treating*. Materials Park, OH: ASM International, 1991.
- ASM INTERNATIONAL. *ASM Handbook, Volume 9: Metallography and Microstructures*. Materials Park, OH: ASM International, 1992.
- ASM INTERNATIONAL. *Handbook of heat treatment of steels*. Materials Park: ASM International, 2016.
- ASM INTERNATIONAL. *Metals handbook: properties and selection of steels*. 11. ed. Ohio: ASM International, 2021.
- BAKHSI, S.; MIRAK, A. R. Evaluation of the effect of low temperature isothermal heat treatment on mechanical properties and fracture toughness of AISI 4340 ultra-high strength steels sheet. *Metallurgical Engineering*, v. 22, n. 4, p. 307–316, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.22076/me.2020.116053.1265>. Acesso em: [07/04/2025].
- BOZORTH, Richard M. *Ferromagnetism*. New York: IEEE Press, 1993.
- BRYSON, William E. *Heat Treatment, Selection, and Application of Tool Steels and High Alloy Steels*. Cincinnati: Hanser Publications, 1999.
- CALLISTER JUNIOR, William D.; RETHWISCH, David G. *Materials science and engineering: an introduction*. 10. ed. Hoboken: Wiley, 2018.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Materials science and engineering: an introduction*. 10th ed. New York: Wiley, 2020.
- CHIKAZUMI, S. *Physics of Ferromagnetism*. 2. ed. Oxford: Clarendon Press, 1997.
- COSTA, A. B.; NASCIMENTO, D. S.; LIMA, C. V. *Influência da taxa de aquecimento do tratamento térmico final na microestrutura e textura do aço inoxidável ferrítico AISI 430 estabilizado ao nióbio*. *Revista Matéria*, v. 27, n. 3, p. 1–12, 2022.
- CULLITY, Bernard D.; GRAHAM, C. D. *Introduction to magnetic materials*. 2. ed. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2011.
- DAVIS, Joseph R. (Ed.). **Alloying: understanding the basics**. ASM international, 2001.
- DIETER, G. E.; BACON, D. J. *Mechanical metallurgy*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2013.
- FONTANA, Mars G. *Corrosion Engineering*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2005.
- GERDAU, AÇOS FINOS PIRATINI. *Manual de Aços. Edição atualizada*, 2003.
- HONEYCOMBE, R. W. K.; BHADESHIA, H. K. D. H. *Steels. Microstructure and Properties*.

Londres: Edward Arnold, 1995.

KRAUSS, George. *Steels: Processing, Structure, and Performance*. Materials Park, OH: ASM International, 2005.

KUMAR, S.; GUPTA, A. *Engineering materials: properties and applications of metals and alloys*. New Delhi: PHI Learning, 2015.

MONTGOMERY, Douglas C.; PECK, Elizabeth A.; VINING, Geoffrey G. *Introduction to linear regression analysis*. 5th ed. Hoboken: Wiley, 2012.

OLIVEIRA, M. A.; MOURA, F. J.; SANTOS, G. R. *Magnetic properties and retained austenite quantification in SAE 4340 steel*. Materials Science Forum, v. 1010, p. 88–94, 2020.

SAFI, S. M.; GIVI, M. K. A new step heat treatment for steel AISI 4340. *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov*, n. 2, p. 19–22, 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/263161448_A_New_Step_Heat_Treatment_for_Steel_AISI_4340. Acesso em: [07/04/2025].

SILVA, J. F.; ALMEIDA, R. P.; FERREIRA, T. R. *Analysis of quenching parameters in AISI 4340 steel by using design of experiments*. Journal of Materials Processing Technology, v. 298, p. 117–125, 2021.

TOTTEN, G. E.; HOWES, M. A. H. *Steel heat treatment handbook*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 1997.

TOTTEN, G. E.; XIE, L.; FUNATANI, K. *Handbook of mechanical alloy design*. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2018.

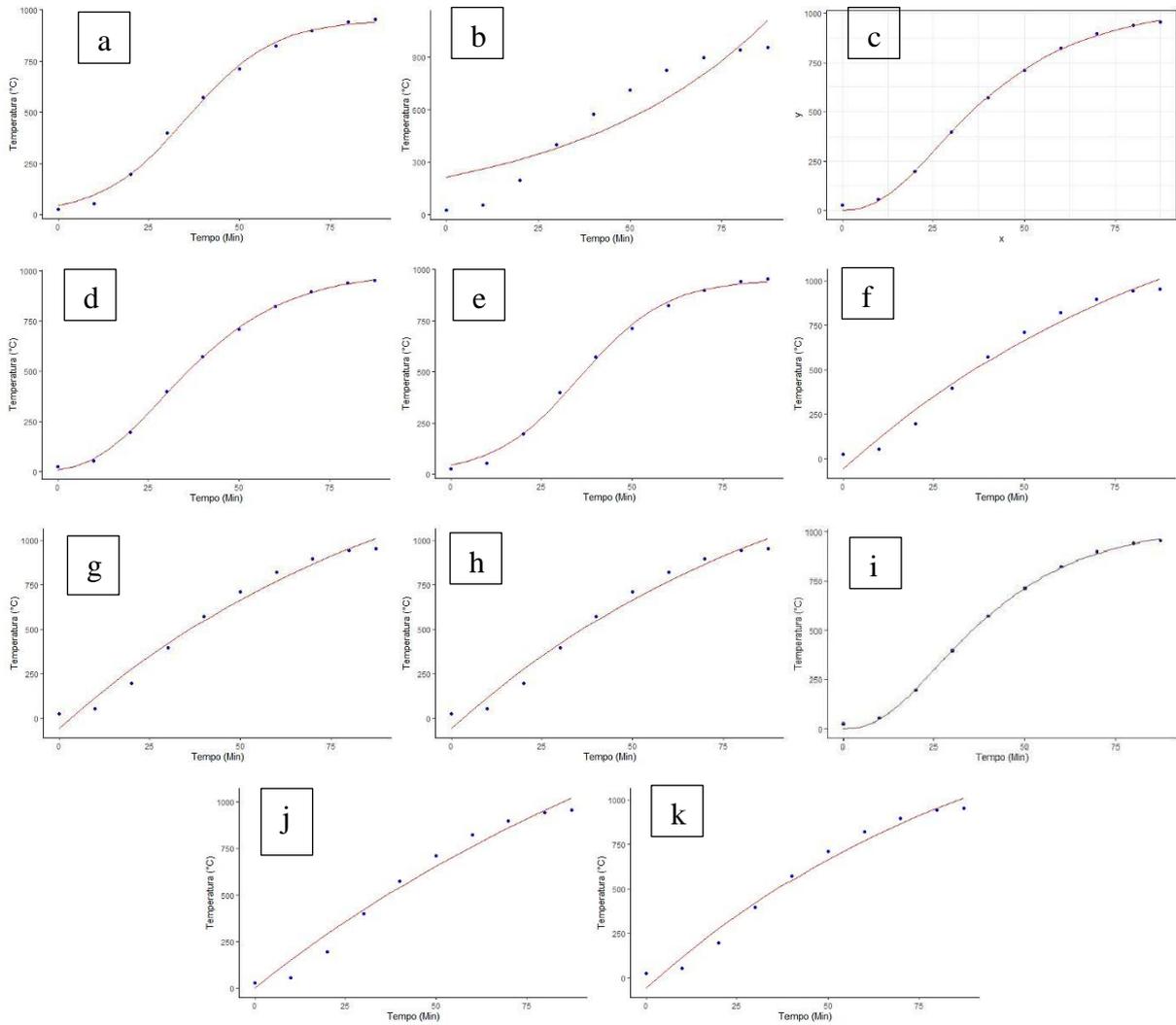
TOTTEN, George E.; MACKENZIE, D. Scott. *Handbook of aluminum: physical metallurgy and processes*. Boca Raton: CRC Press, 2003. v. 1.

APÊNDICE A – PROGRAMAÇÃO DO FORNO MULFA PARA SIMULAÇÃO DE TRATAMENTO TÉRMICO

CICLO DE OPERAÇÃO		CICLO DE PROGRAMAS				CICLO DE SINTONIA		CICLO DE ALARMES	
Parâmetro	Valor	Parâmetr o	Valor	Parâmetr o	Valor	Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Control (Auto) Prn Run	Yes 6 Yes	Program Number (Prn)	6	Program Time event (Pe5)	0	(Atun) Proporcional	0,3	Function Alarm (FuA1)	Lo
CICLO DE ESCALA		Program Time Base (Tbas)	1	Program event (Pe5)	0	Integral Rate (Ir)	0,48	Function Alarm (FuA2)	Off
Type	1	Program Tolerance (Ptol)	20	Program SP (Psp5)	0	Time (dt) Cycle Time	30	Function Alarm (FuA3)	Off
Decimal Point (Dppo) Unit	25 °C	Program SP (Psp0)	40	Program Time (Pt6)	0	Action (Act) Bias	Re 0.0	Function Alarm (FuA4)	Off
Offset (offs)	0	Program Time (Pt1)	1	Program event (Pe6)	0	Limit (ouLL)		Bloking	No
Setpoint Low Limit (SPLL)	0	Program event (Pe1)	0	Program SP (Psp6)	0	Limit (ouLL)		(BLA1) Bloking	No
Setpoint High Limit (SPLL)	1250	Program SP (Psp1)	980	Program Time (Pt7)	0	(Sfst) Sp.a1	1250	(BLA2) Bloking	No
Remote SP Low Limit (RSL) Remote SP High Limit (RSL)	-1 0	Program Time (Pt2)	0	Program event (Pe7)	0	Sp.a3	0	(BLA3) Bloking Alarm (BLA4)	No
Baud Rate (baud) Addr	0 1	Program event (Pe2)	0	Program SP (Psp7)	0	Sp.a4	0	Histerises of Alarm (HYA1)	0
		Program SP (Psp2)	0	Link Program (LP)	0			Histerises of Alarm (HYA2)	0
		Program Time (Pt3)	0					Histerises of Alarm (HYA3)	0
		Program event (Pe3)	0					Histerises of Alarm (HYA4)	0
		Program SP (Psp3)	0					Alarm Time t1 (A1t1)	0
		Program Time (Pt4)	0					Alarm Time t1 (A1t2)	0
		Program event (Pe4)	0					Alarm Time t2 (A2t1)	0
		Program SP (Psp4)	0					Alarm Time t2 (A2t2)	0
CICLO DE IOS		MUDANÇA DE PARÂMETROS DE ACORDO COM A AMOSTRA							
Io1	5	CP	Ptol	Psp1	Psp2				
Io2	5	01	20	870	870				
Io3	0	02	10	870	870				
		03	10	870	870				

**APÊNDICE B – CURVAS DE AQUECIMENTO DOS MODELOS DE REGRESSÃO
NÃO LINEAR SIMULADOS PARA A CONDIÇÃO COM O FORNO EM VAZIO E
PTOL =20**

Modelos simulados pelo software RStudio para a curva de aquecimento com Ptol 20: a) Exponencial1, b) Exponencial2, c) Michierlich, d) Gompertz, e) Logístico, f) Meloun_I, g) Meloun_II, h) Brody, i) VonBertalanffy, j) Michaelis_Menten, k) Geral



Fonte: Próprio Autor.

**APÊNDICE C – CURVAS DE AQUECIMENTO DOS MODELOS DE REGRESSÃO
NÃO LINEAR SIMULADOS PARA A CONDIÇÃO COM O FORNO EM VAZIO E
PTOL =10**

Modelos simulados pelo software RStudio para a curva de aquecimento com Ptol 120: a) Exponencial1, b) Exponencial2, c) Michierlich, d) Gompertz, e) Logístico, f) Meloun_I, g) Meloun_II, h) Brody, i) VonBertalanffy, j) Michaelis_Menten, k) Geral

