



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

BRUNA CARLA BALBINO DOS SANTOS

ESTUDO DE AÇOS-FERRAMENTA E DE CONSTRUÇÃO MECÂNICA VISANDO
PRODUÇÃO DE FERRAMENTAS DE ALTA RESISTÊNCIA AO DESGASTE
MECÂNICO

FORTALEZA

2025

BRUNA CARLA BALBINO DOS SANTOS

ESTUDO DE AÇOS-FERRAMENTA E DE CONSTRUÇÃO MECÂNICA VISANDO
PRODUÇÃO DE FERRAMENTAS DE ALTA RESISTÊNCIA AO DESGASTE
MECÂNICO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Jeferson Leandro Klug.
Co-orientador: Eng. Dr. Luís Flávio Gaspar Herculano.

FORTALEZA
2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S233e Santos, Bruna Carla Balbino dos.

Estudo de aços-ferramenta e de construção mecânica visando produção de ferramentas de alta resistência ao desgaste mecânico / Bruna Carla Balbino dos Santos. – 2025.
52 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Jeferson Leandro Klug.

Coorientação: Prof. Dr. Luís Flávio Gaspar Herculano.

1. Ligas ferrosas. 2. Dureza. 3. Tenacidade. I. Título.

CDD 669

BRUNA CARLA BALBINO DOS SANTOS

ESTUDO DE AÇOS-FERRAMENTA E DE CONSTRUÇÃO MECÂNICA VISANDO
PRODUÇÃO DE FERRAMENTAS DE ALTA RESISTÊNCIA AO DESGASTE
MECÂNICO

Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia
Metalúrgica do Centro de Tecnologia da
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial à obtenção do grau de bacharel em
Engenharia Metalúrgica

Aprovada em: 20/02/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jeferson Leandro Klug (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng Dr Luís Flávio Gaspar Herculano
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira
Universidade Federal Do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Raimunda Santos e José Carlos dos Santos por toda dedicação, empenho e esforço em minha criação ao longo dos anos de minha existência

AGRADECIMENTOS

A Deus, criador soberano de todo o universo.

Aos orixás Ogum e Oxum, pela determinação que tive em continuar no estágio depois de momentos de instabilidades e por me fazerem entender que não estou sozinha na jornada da vida.

A Santo Antônio, por me mostrar através de momentos de instabilidade da vida, qual o melhor caminho a ser seguido. Obrigada por dar luz ao meu caminho, guiando-me até onde cheguei e por me fazer vivenciar com alegria meus momentos de glória.

Aos meus pais, os insubstituíveis, Raimunda Maria Balbino Dos Santos e José Carlos Dos Santos pelo apoio motivacional e incentivo que me deram desde o momento em que entrei na universidade e decidi cursar Engenharia Metalúrgica. Sempre os levarei em meu coração onde eu estiver.

À minha tia Terezinha Maria Balbino Dos Santos, pelos momentos de conselhos, orações e motivações para um futuro próspero.

À minha coelhinha Luna Ashley Santos, pelas alegrias que me deu nos momentos de instabilidade.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Jeferson Leandro Klug pela oportunidade que me fez superar inseguranças e desmotivações pessoais. Além de me oferecer suporte motivacional e conselhos para o planejamento e confecção deste trabalho.

Ao Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM), em especial ao Dr. Luís Flávio Herculano, por toda motivação, conselhos e coorientação e ao prof. Jorge Luís Cardoso pelo apoio em realizar os testes de composição química nas amostras de aço trabalhadas nessa monografia.

Ao Laboratório de Pesquisa, Tecnologia e Soldagem (LPTS), da Universidade Federal Do Ceará pelo apoio, adicional, nos testes de composição Química das respectivas amostras estudadas.

Ao colega Fabrício da Silva Vasconcelos, pela amizade, atenção e explicações destinadas a confecção normativa deste trabalho.

A Família WH2 Soluções, em especial à pessoa do prof. William Leite e toda sua família, pela oportunidade, interesse, apoio, fomento e incentivo à produção deste trabalho.

“Even if you are not ready for the day, it cannot
always be night” (Kanye West, 2021).

RESUMO

Os aços ferramenta e de construção mecânica possuem uma ampla gama de aplicações, que vão desde a fabricação de matrizes até cilindros. Este estudo teve como objetivo analisar esses tipos de aços com foco na produção de ferramentas que apresentem elevada resistência ao desgaste mecânico. A pesquisa incluiu uma revisão abrangente da literatura em livros, monografias, manuais e artigos, bem como consultas em sites especializados em tratamentos térmicos, buscando identificar o ciclo térmico ideal para os aços D2, D6, 1045 e 4340. Após a definição dos ciclos térmicos, foram realizados testes de composição química em amostras dos aços, fornecidas por uma indústria metalúrgica, nos Laboratórios de Caracterização de Materiais e Pesquisa em Tecnologia e Soldagem da UFC. Esses testes visaram identificar a natureza química dos materiais. Em seguida, foram realizadas caracterizações microestruturais dos aços D2 e D6, utilizando um microscópio óptico Zeiss e um Microscópio Eletrônico de Varredura da Central Analítica da UFC. O objetivo foi verificar se as microestruturas desses aços atendiam aos padrões estabelecidos para aços recozidos. Os resultados mostraram que as amostras de D2 e D6 apresentavam composições elementares dentro das designações X 155 CrVMo 12 1 e X 210 CrW 12, classificando-as como aços-ferramenta para trabalho a frio, de alto carbono e alto cromo, contendo carbonetos de carbono e cromo, com adição de tungstênio. Essas microestruturas são comuns em aços de alto cromo que passaram por recozimento. Os aços 1045 e 4340 apresentaram teores de elementos químicos dentro dos padrões da norma SAE, sendo, portanto, classificados como aços de construção mecânica.

Palavras-chave: ligas ferrosas 1; dureza 2; tenacidade 3.

ABSTRACT

Tool and mechanical construction steels have diverse applications, from the manufacture of dies to cylinders. This study aimed to investigate these steels for the production of tools with high resistance to wear and abrasion. The research involved a bibliographical review of books, monographs, manuals and articles, as well as searches on websites specialized in heat treatments, aiming to determine the ideal thermal cycle for steels D2, D6, 1045 and 4340. After defining the thermal cycles, chemical composition tests were carried out on steel samples, provided by a metallurgical industry, at the UFC Materials Characterization and Welding Research Laboratories. These tests aimed to identify the chemical nature of the materials. Then, microstructural characterizations of the D2 and D6 steels were carried out, using a Zeiss optical microscope and a Scanning Electron Microscope from the UFC Analytical Center. The objective was to verify whether the microstructures of these steels met the standards established for annealed steels. The results showed that the D2 and D6 samples had elemental compositions within the designations X 155 CrVMo 12 1 e X 210 CrW 12, classifying them as tool steels for cold work, high carbon and high chromium, containing carbon and chromium carbides, with the addition of tungsten. Such microstructures are common in high chromium steels that have undergone annealing. Steels 1045 and 4340 presented chemical element contents within SAE standards, and are therefore classified as mechanical construction steels.

Keywords: ferrous alloys 1; hardness 2; toughness 3.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama Ferro-Carbono.....	21
Figura 2 - Curva de resfriamento do diagrama isotérmico para aços eutetóides.....	22
Figura 3 - Diagrama de resfriamento contínuo do aço AISI D2.....	25
Figura 4 - Diagrama de resfriamento contínuo do aço AISI D6.....	25
Figura 5 - Diagrama de resfriamento contínuo para o aço SAE 4340.....	25
Figura 6 - Diagrama de resfriamento contínuo para o aço SAE 1045.....	26
Figura 7 - Representação da velocidade de esfriamento da peça em diferentes meios de resfriamento.....	27
Figura 8 - Ciclo térmico de revenimento.....	28
Figura 9 - Curvas de revenimento para o aço D2 em diferentes faixas de temperatura.	33
Figura 10- Relação entre temperatura de revenido e dureza para aços ferramenta D2.....	33
Figura 11- Curva de revenimento para o aço D2.....	34
Figura 12 Curva de revenimento do Aço D6.....	36
Figura 13 Correlação entre temperatura de revenimento e durezas HRC.....	36
Figura 14 Imagem em Microscopia Óptica do Aço 1045 Temperado em água. Martensitas em marcação vermelha (aumento de 200x)	37
Figura 15 Curva de revenimento do Aço 1045.....	38
Figura 16 Curva De revenimento do aço 4340.....	39
Figura 17 Amostra dos Aços Ferramentas D2 e D6 e Construção Mecânica 1045 e 4340.....	41
Figura 18 Microscopia óptica do aço AISI D2 (A) e Microscopia óptica do aço AISI D6 (B).....	45
Figura 19 Micrografia eletrônica de varredura do aço D2 (C) e Micrografia Eletrônica de Varredura - Aço D2 (D).....	46
Figura 20 Micrografia eletrônica de varredura- Aço D6 (E) e Micrografia eletrônica de varredura - Aço D6 (F).....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Composição química do Aço D2 (% em massa).....	32
Tabela 2 -	Valores de temperaturas de austenitização aplicados em empresas comerciais e referência literária.....	32
Tabela 3 -	Composição química do Aço D6(% em massa).....	35
Tabela 4 -	Consulta de temperaturas de austenitização em diferentes empresas e comparação com a literatura especializada.....	35
Tabela 5 -	Relação entre tempo de resfriamento e classificação do óleo.....	36
Tabela 6 -	Composição química do aço SAE 1045 (% em massa).....	37
Tabela 7 -	Composição química aço 4340(% em massa).....	39
Tabela 8 -	Composição química do Aço AISI D2.....	43
Tabela 9 -	Composição química do Aço AISI D6.....	43
Tabela 10 -	Composição química do Aço SAE 1045.....	43
Tabela 11 -	Composição química do aço SAE 4340.....	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CFC	Cúbica de Face Centrada
CCC	Cúbica de Corpo Centrado
C	Carbono
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CH ₄	Metano
Fe ₃ C	Carbeto de Ferro
Fe	Ferro
FeO	Óxido de Ferro
H ₂	Hidrogênio
H ₂ O	Água
O ₂	Oxigênio

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVO	17
2.1 Objetivo Geral	17
2.2 Objetivos Específicos	17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 Princípios de influência fundamentais dos Tratamentos Térmicos	18
3.1.1 <i>Atmosfera do forno</i>	18
3.1.2 <i>Aquecimento</i>	19
3.1.3 <i>Resfriamento</i>	19
3.1.4 <i>Empenamento</i>	20
4 TRATAMENTOS TÉRMICOS	21
4.1 <i>Têmpera</i>	21
4.2 <i>Diagrama TTT (Tempo-Temperatura-Transformação)</i>	22
5 AUSTENITA RETIDA	23
5.1 <i>Tamanho de grão austenítico</i>	23
5.2 <i>Homogeneidade da Austenita</i>	24
5.3 <i>Curvas de Resfriamento Contínuo</i>	24
6 MEIOS DE RESFRIAMENTO	26
7 REVENIMENTO	28
7.1 <i>Endurecimento Secundário</i>	28
7.2 <i>Fragilidade do Revenido</i>	29
8 AÇOS FERRAMENTA E AÇOS DE CONSTRUÇÃO MECÂNICA	29
8.1 <i>Aços Ferramenta</i>	29
8.2 <i>Aços Baixa liga para Construção Mecânica</i>	31
9 TRATAMENTO TÉRMICO DOS AÇOS FERRAMENTA E CONSTRUÇÃO MECÂNICA	32
9.1 <i>Aço D2</i>	32
9.2 <i>Aço D6</i>	34
9.3 <i>Aço 1045</i>	37
9.4 <i>Aço 4340</i>	38
10 MATERIAIS E MÉTODOS	41
10.1 <i>MATERIAIS</i>	41
10.2 <i>MÉTODOS</i>	41
10.2.1 <i>Corte Cutt Off das amostras</i>	41
10.2.2 <i>Revisão Bibliográfica</i>	40

<i>10.2.3 Preparação para os Testes de Composições Químicas</i>	42
<i>10.2.4 Testes de Composições Químicas</i>	42
<i>10.2.5 Preparação Metalográfica</i>	42
<i>10.2.6 Polimento</i>	42
<i>10.2.7 Ataque</i>	42
<i>10.2.8 Microscopia Óptica</i>	42
<i>10.2.9 Microscopia Eletrônica de Varredura</i>	43
11 RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
12 CONCLUSÃO	48
REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento do presente trabalho surgiu a partir de um grande desejo de uma empresa de médio porte, em estabelecer práticas de têmpera e revenimento em peças pré-fabricadas, as quais eram expostas a aplicações que envolvem resistência ao desgaste mecânico. O intuito seria aumentar a vida útil dos materiais quando submetidos às devidas condições de trabalho.

A partir disso, foram adquiridos dois fornos sem atmosfera controlada, um deles para a realização de aquecimento para a austenitização, e o outro, revenimento. Posteriormente, foram adquiridos óleos rápidos para têmpera acelerada, objetivando o resfriamento rápido dos materiais.

Dessa forma, com o intuito de proporcionar condições de tratamento dos aços D2, D6, 1045 e 4340, de maneira alinhada às condições viáveis de trabalho atualmente praticadas na empresa, foi desenvolvida esta monografia como um instrumento de orientação sobre tais materiais, a fim de suprir uma demanda de conhecimento no setor metalúrgico da organização.

Os processos de tratamento mencionados, em grandes empresas, requerem grandes investimentos em equipamentos e insumos, necessários para a realização do processo. Por se tratar de uma empresa de médio porte, buscaram-se formas mais simples e viáveis de se realizar a têmpera e revenimento.

O conceito de Tratamento Térmico segundo Silva (2021, p.34) “[...] É um processo de aquecimento e resfriamento de ligas metálicas ferrosas e não ferrosas em condições controladas de tempo, temperatura, atmosfera e velocidade de resfriamento, possuindo como objetivo causar melhoria em suas propriedades mecânicas”.

A têmpera é a etapa principal do Tratamento Térmico, a qual é realizada com o objetivo de se obter aumento de dureza nas peças. O processo ocorre através de um rápido resfriamento, em diferentes meios, sejam líquidos ou a temperatura ambiente, como ao ar, por exemplo, partindo de uma determinada temperatura situada na região austenítica do material para a formação da estrutura martensítica (ANASTÁCIO, 2018).

Durante a execução da têmpera, o material é exposto a diversas tensões, tanto térmicas devido a severidade do meio de resfriamento, quanto estruturais. O acúmulo de tais tensões pode acarretar danos à integridade das peças. Por conseguinte, deve-se submetê-las ao tratamento de revenimento, para que essas tensões sejam aliviadas (CHIAVERINI, 2008).

O revenimento consiste no reaquecimento do material em temperaturas abaixo da temperatura de austenitização, almejando aliviar as tensões, outrora citadas, e corrigindo a fragilidade martensítica com o consequente aumento de sua ductilidade (ANASTÁCIO, 2020).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Realizar um estudo da aplicação e Tratamentos Térmicos necessários aos aços D2, D6, 1045 e 4340, visando a produção de ferramentas de alta resistência ao desgaste mecânico, considerando amostras oriundas de fornecedores de uma indústria metalúrgica de Fortaleza.

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar a composição elementar dos aços D2, D6, 1045 e 4340, para determinar se os aços comprados dos fornecedores por uma indústria metalúrgica, estão dentro dos padrões estabelecidos nas normas pertinentes.

- Determinar as microestruturas dos aços D2 e D6, para verificar se estão dentro dos padrões estabelecidos nas normas pertinentes, para aços recozidos.

- Fazer uma revisão bibliográfica dos tratamentos térmicos necessários para a produção de ferramentas de alta resistência ao desgaste mecânico, para os aços D2, D6, 1045 e 4340.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Princípios de influência fundamentais dos Tratamentos Térmicos.

3.1.1 Atmosfera do forno

São fatores fundamentais, para o êxito nas práticas de Tratamento Térmico, o controle de parâmetros como aquecimento, resfriamento e atmosfera do forno (CHIAVERINI, 1990). O conhecimento de tais parâmetros torna-se importante, pois, fenômenos como a descarbonetação e a oxidação, como descritas a seguir, são passíveis de ocorrer devido à ausência de atmosfera controlada em fornos de aquecimento para têmpera, quer a microestrutura do aço esteja na forma de Cementita (Fe_3C) ou no campo austenítico (COLPAERT, 2008). Tais fenômenos de oxidação e descarbonetação, estão descritos pelas seguintes reações:

a) Reações de Oxidação

- $\text{Fe} + \text{H}_2\text{O} = \text{FeO} + \text{H}_2$
- $\text{Fe} + \text{CO}_2 = \text{FeO} + \text{CO}$
- $2\text{Fe} + \text{O}_2 = 2\text{FeO}$

b) Reações de Descarbonetação

- $2\text{C} + \text{O}_2 = 2\text{CO}$
- $\text{C} + \text{CO}_2 = 2\text{CO}$
- $\text{C} + 2\text{H}_2 = \text{CH}_4$

Portanto, a utilização de atmosferas controladas como fornos a vácuo e banhos de sal em que a peça é imersa em sal fundido, submetida à respectiva temperatura de austenitização, são alternativas empregadas para evitar maiores problemas relacionados ao tratamento térmico dos materiais (COLPAERT, 2008).

Alternativas econômicas como a utilização de coque queimado, uso de limalha de ferro fundido cinzento, e uso de carvão vegetal granulado, são itens comumente empregados para evitar tais processos de oxidação e descarbonetação (CHIAVERINI, 2008). Porém, somente o controle de parâmetros relativos a interações como CO/CO_2 e $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$ irão promover o controle dos elementos oxigênio e carbono. (COSTA e MEI, 1988).

3.1.2 Aquecimento

O aquecimento é uma das etapas mais importantes do tratamento térmico. O desconhecimento do controle de parâmetros como controle da velocidade de aquecimento, o tempo de exposição a temperatura e a distribuição de tal temperatura na carga poderão ocasionar entraves como empenamento ou fissuras (CHIAVERINI, 2008).

Segundo Martins (2018, p. 24),” [...] O tempo deve ser longo o suficiente para garantir o aquecimento da peça por completo (encharque), o qual é proporcional ao tamanho da peça, isto é, quanto maior o tamanho da peça, maior será o tempo de Tratamento Térmico”

A temperatura torna-se função do tipo de tratamento térmico bem como da sua composição química, tais parâmetros devem ser determinados com o intuito do material adquirir as devidas melhorias metalúrgicas almejadas (MARTINS, 2018).

Tendo em vista isso, é relevante comentar que, para alguns tipos de aços ferramentas, levando em consideração as altas temperaturas adotadas, faz-se preciso realizar a etapa de pré-aquecimento. Exceto em peças pequenas de formato simples, o pré-aquecimento pode ser descartado, sendo utilizado, normalmente, como uma alternativa a se evitar fissuras e distorções durante o choque térmico quando o material é exposto a altas temperaturas de austenitização (ASM, 1991).

De toda forma, apenas se pode obter um aquecimento uniforme se existir entre as dimensões do forno e a peça, uma correlação adequada. Ou seja, somente 1/3 da capacidade do forno deverá ser ocupado pelo material, do contrário, não se deve reter expectativas em relação a uniformidade do aquecimento (SOARES, 2010).

3.1.3 Resfriamento

O resfriamento é a etapa principal do tratamento térmico, na qual é gerada a microestrutura responsável pelo aumento de dureza nas peças. Através da variação da velocidade de resfriamento, pode-se obter microconstituintes que vão desde a perlita grosseira com dureza diminuta, até o constituinte de elevada dureza, como a martensita, por exemplo. Este processo é dependente, todavia, da velocidade de resfriamento ou taxa de resfriamento, composição química do aço e também das dimensões e formatos das peças (CHIAVERINI, 2008).

Os meios de resfriamento empregados no processo de Tratamento Térmico são de diversas naturezas como, água, óleo, salmoura, ar e soluções aquosas de diversos tipos (ASM, 1991).

O meio considerado mais brando, é o de resfriamento dentro do forno, do qual, torna-se mais agressivo na medida que passa para um meio externo, como por exemplo, meios líquidos dependendo, portanto, do seu grau de agitação. Isto posto, deve-se salientar que a escolha do melhor meio de resfriamento é feita mediante o objetivo da microestrutura desejada a determinadas profundidades. Nesse sentido, meios como a água, por exemplo, são caracterizados como meios mais agressivos devido a sua alta velocidade de esfriamento, podendo, mediante em determinadas situações, provocar empenamentos e ruptura das peças. Seu emprego, portanto, se restringe a materiais de baixo carbono e de simples formato (CHIAVERINI, 1990).

3.1.4 Empenamento

O empenamento consiste na distorção provenientes de tensões residuais produzidas no material ao longo do processo fabril. Tais tensões residuais além de serem advindas da interação da peça com o meio, irão afetar as propriedades do material no que tange a resistência a fadiga, resistência a corrosão e ruptura (AMARAL, 2016).

Segundo Chiaverini (1990, p. 171) “[...]Alguns pormenores devem ser levados em consideração quando se fala em evitar empenamento das peças bem como realizar um adequado manuseamento delas dentro do forno”. De fato, é necessário que haja o entendimento de que é preciso o correto manuseio das peças de forma a promover o mínimo risco de dano a saúde das peças. Sugere-se, portanto, que seções grandes sejam colocadas horizontalmente e peças finas sejam posicionadas verticalmente dentro do equipamento. Assim, como na etapa de resfriamento para têmpera, se faz preciso que as dimensões mais finas sejam colocadas primeiro no banho (CHIAVERINI, 2008)

Além disso, a partir de uma análise da projeção da peça, proporcionando o arredondamento dos locais propagadores de tensões, distanciamento de possíveis furos presentes nos locais onde irão receber têmpera, utilização de insumos como óleos em temperaturas entre 150 e 200°C, e o aumento da concentração de polímeros, são algumas alternativas que se usam para erradicação da ocorrência de empenamento. Esse entrave, é causado pela existência de tensões tanto térmicas, quanto estruturais, dos quais se acumulam no material devido a etapa de resfriamento. Quando essas tensões superam o limite de escoamento do aço, as peças serão empenadas. Já no caso destas tensões superarem o limite de resistência a tração do mesmo, irão apresentar fissuramento em sua superfície (CHIAVERINI, 2008).

4 TRATAMENTOS TÉRMICOS

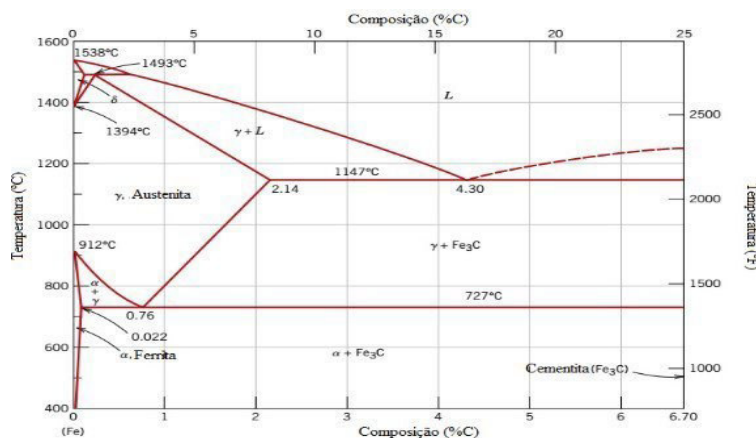
4.1 Têmpera

A Têmpera consiste no processo de aquecimento e resfriamento rápido do aço acima da zona crítica, em meios, comumente utilizados como água, ar ou óleo (SANTOS, 2021). Dessa forma, evita-se, portanto, a transformação da austenita em altas temperaturas, em estruturas mistas como a perlita e a bainita, por exemplo. Obtendo-se ao final do processo, uma estrutura metaestável chamada martensita (COSTA E MEI, 2010).

As chamadas estruturas mistas, como perlita e bainita, por exemplo, possuem dureza inferior à da martensita e são responsáveis pelo baixo valor de resistência ao choque e limite de escoamento dos aços (COSTA E MEI, 1988). Isto posto, com a formação da estrutura martensítica, aumenta-se, conseqüentemente, a dureza e a tenacidade dos materiais (SANTOS, 2021).

O processo de aquecimento e resfriamento para a têmpera pode ser facilmente entendido através do fenômeno de alotropia do ferro como mostra o diagrama Fe-C, exemplificado a seguir (Figura 3):

Figura 1– Diagrama Ferro-Carbono.



Fonte: Santos (2021).

Para um aço hipoeutetóide, por exemplo, com composição química em torno de 0,40% C, tem-se à temperatura ambiente, microestrutura composta de ferrita e perlita, à medida que o aço irá sendo aquecido, ao chegar na devida temperatura de austenitização, a microestrutura do material em questão estará solidificada sendo composta por uma solução sólida saturada de carbono em ferro gama com 0,40% C dissolvido em sua matriz, sendo denominada como austenita, cujo reticuladado é Cúbico de Face Centrada (CHIAVERINI, 1990).

Em posterior resfriamento rápido, em temperatura abaixo de 912 °C, a solubilidade do carbono no ferro gama começa a cair, devido o início da transformação do reticulado FCC para CCC acontecer, havendo separação da ferrita e retendo parte do carbono na austenita (CHIAVERINI, 2008).

Em 727 ° C, o aço com a referida composição de carbono, inicialmente citada, irá apresentar quantidade máxima de ferrita e carbono remanescente na austenita em torno de 0,77% C. Tal transformação é abrupta possuindo como produtos, no caso de aços hipoeutetóides, ferrita e perlita, e cementita e perlita, em aços hipereutetóides (CHIAVERINI, 1990).

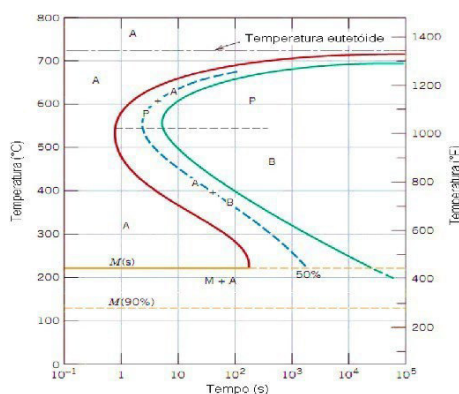
Para aços Hipereutetóides, não se deve exceder a devida temperatura de aquecimento estabelecida para cada tipo de aço, pois, caso contrário, poderá haver o aparecimento de estruturas grosseiras cujo maior entrave consiste na fragilidade conferida ao material (CHIAVERINI, 1990).

4.2 Diagrama TTT (Tempo-Temperatura-Transformação)

A Martensita, cuja obtenção se deve ao tangenciamento da curva em C do diagrama TTT, é o constituinte mais duro dos aços, podendo ser definida como sendo uma solução sólida supersaturada de carbono em ferro alfa. (CHIAVERINI, 1990).

Sua extrema dureza está relacionada a deformação do reticulado cúbico centrado frente a supersaturação (RETHWISCH, 2013). Para melhor entendimento sobre a formação da martensita e os fatores que interferem em sua formação, faz-se necessário o conhecimento do diagrama Tempo, Temperatura e Transformação (Figura 4).

Figura 2– Curva de resfriamento do diagrama isotérmico para aços eutetóides



Fonte: Echeverri (2012, p.45).

O diagrama TTT permite a obtenção da fração volumétrica transformada durante um processo de transformação isotérmico. A região austenítica, compreendida pelas curvas vermelha e verde, possui como produtos através do resfriamento lento, a perlita e a bainita, formadas através de um processo difusional. Em linhas inferiores, encontram-se a região martensítica representada pelas siglas Ms e M90%, explicitando a temperatura de início e fim da transformação martensítica (RETHWISCH, 2013).

A forma em C das curvas de transformação, é característica de transformações difusionais, as quais ocorrem mediante os fenômenos de nucleação e crescimento (ECHEVERRI, 2012).

Alguns fatores exercem influência fundamental em relação a dureza martensítica, uma delas, é o carbono. O carbono possui grande influência no processo de têmpera dos aços, porque tal elemento é capaz de atrasar as reações de início e fim da perlita, além de promover o rebaixamento da temperatura martensítica, a medida que o teor de carbono cresce (COSTA E MEI, 1988).

Isso ocorre pelo fato deste elemento quando imerso em solução sólida, elevar a resistência do cisalhamento da estrutura austenítica, sendo preciso, todavia, fornecer mais energia para que tal cisalhamento leve ao início da transformação martensítica (CHIAVERINI, 1990).

5 AUSTENITA RETIDA

A transformação martensítica é função do grau de resfriamento, podendo haver, à temperatura ambiente, uma certa quantidade de austenita retida, possuindo como raízes principais para suas formações, a composição química, em especial, o teor de carbono. (FONSECA ET. AL., 2021).

O maior impasse em grandes volumes, é a diminuição da dureza e possíveis alterações dimensionais nas peças. Sua eliminação consiste além do revenimento, em práticas como tratamento sub-zero e encruamento (COSTA E MEI, 1988).

5.1 Tamanho de grão austenítico.

Segundo consta em Chiaverini (2008, p.38),” [...] Através de uma granulação maior, é possível obter-se um atraso nas transformações austeníticas, levando ao fato de que a medida que o tamanho de grão cresce, mais facilmente é deslocada a curva TTT para a direita.

Contudo, a interpretação de tal fato pode ocasionar o entendimento de obter um material com granulação grosseira, o que é errôneo, pois, na medida em que há contínuo crescimento do grão, maiores são as chances de se obter fragilidade e perda de ductilidade (REED-HILL,1982)

O conhecimento sobre o efeito do tamanho de grão austenítico na temperabilidade do aço, se faz importante, pois, o mesmo exerce influência no que concerne a velocidade crítica de têmpera, ou seja, em outras palavras, a respectiva velocidade diminui à medida que o tamanho de grão cresce (SOARES, 2010).

5.2 Homogeneidade da Austenita

A homogeneidade da austenita é outro fator que deve ser mencionado, quanto mais homogênea a austenita, haverá maior propensão do deslocamento da curva em C do joelho de transformação para a direita, retardando, pois, as transformações perlíticas do material (CHIAVERINI, 2008).

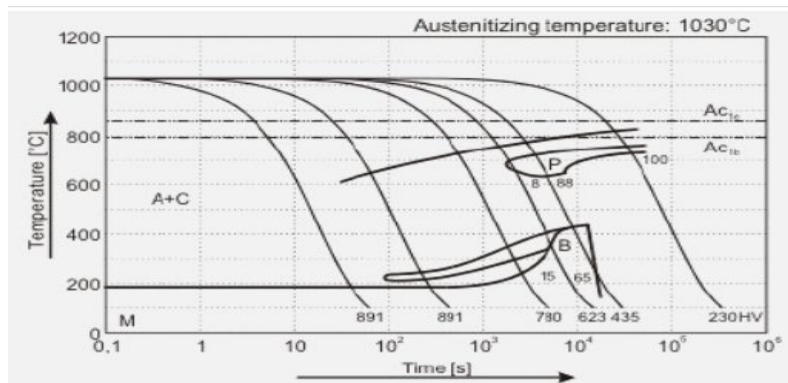
5.3 Curvas de Resfriamento Contínuo.

É conveniente saber, portanto, que na prática, a maioria dos tratamentos térmicos em nível comercial, não ocorrem à temperatura constante. É comum haver o aquecimento até a temperatura do campo austenítico e em seguida, promover contínuo resfriamento até a temperatura ambiente, com velocidades de resfriamento dependentes, além do tipo de tratamento, do tamanho e forma da amostra (REED-HILL,1982).

Uma das características do resfriamento contínuo é que o tempo para que as transformações se completem é retardado, além de, poder possuir controle sobre a taxa de variação de temperatura de acordo com o meio de resfriamento (RETHWISCH.ET.AL, 2013).

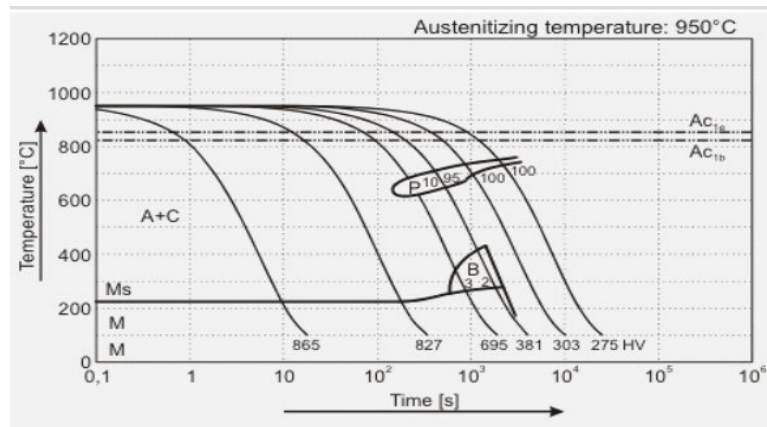
A martensita presente na parte inferior do diagrama, poderá se formar dependendo da taxa de resfriamento adotada, advindo do meio de resfriamento selecionado, sendo representada como sendo a tangente que toca a curva do cotovelo do diagrama (CHIAVERINI,1990). A representação do diagrama de resfriamento contínuo para os aços AISI D2 (figura 3), AISI D6 (figura 4), SAE 4340 (figura 5) E SAE 1045 (figura 6).

Figura 3 – Diagrama de resfriamento contínuo do aço AISI D2.



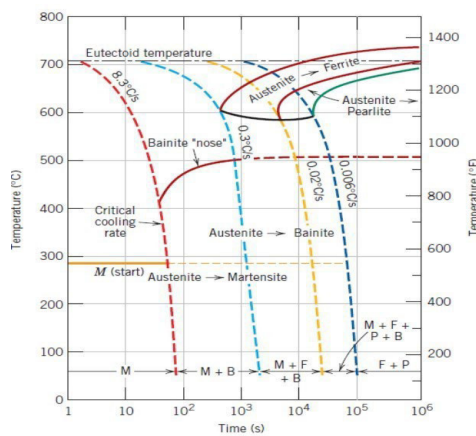
Fonte: Interlloy (2011).

Figura 4 – Diagrama de resfriamento contínuo do aço AISI D6



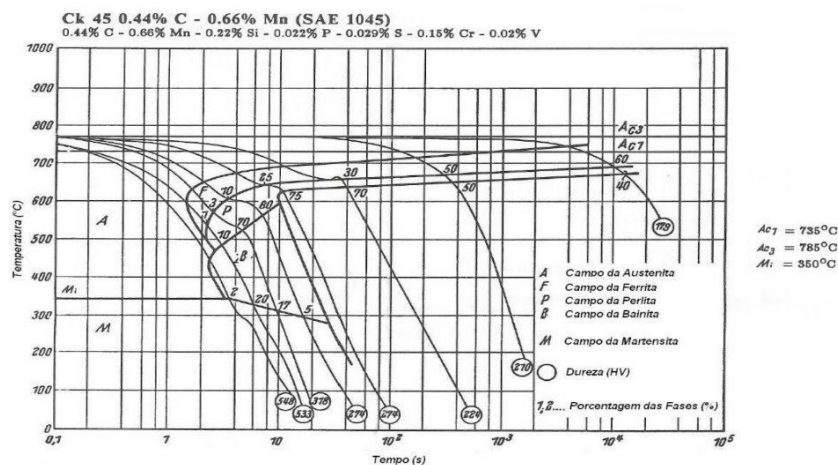
Fonte: Interlloy (2011).

Figura 5 – Diagrama de resfriamento contínuo para o aço SAE 4340



Fonte: Echeverri (2012).

Figura 6 – Diagrama de Resfriamento contínuo para o aço SAE 1045



Fonte: Echeverri (2012).

6 Meios de Resfriamento

Como já mencionado, o resfriamento é realizado em etapa seguinte a de austenitização, sendo proporcionado um rápido decréscimo de temperatura na peça através do choque térmico causado pela utilização de meios como Água (pura ou adicionada de sais ou polímeros), óleo e ar (COSTA E MEI, 2010).

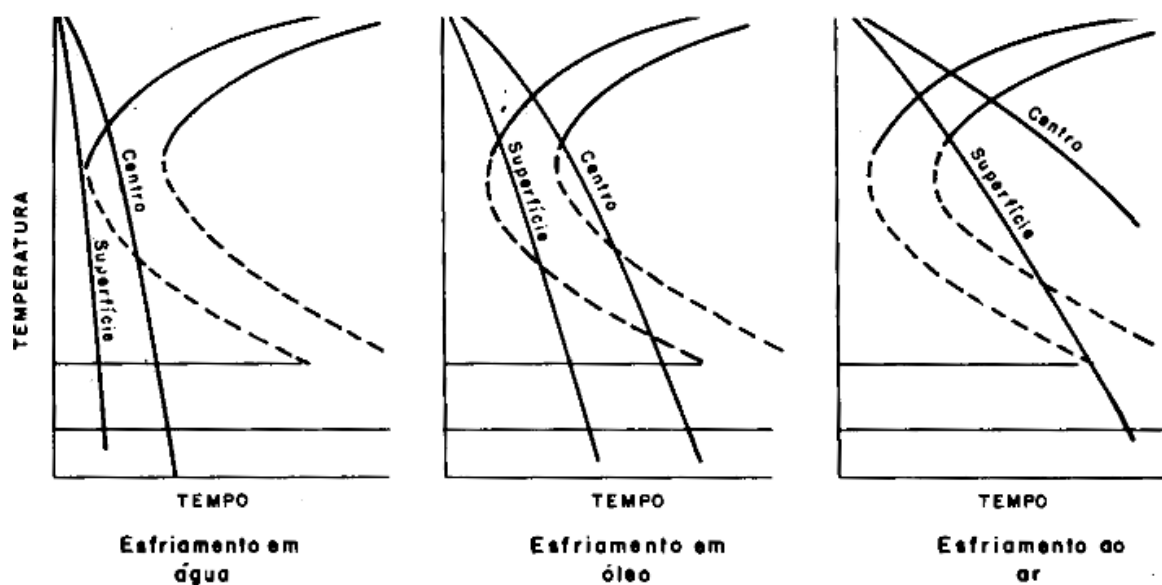
Entretanto, a seleção do melhor meio de resfriamento necessário para se atingir a microestrutura desejada ao objetivo em questão, depende além da composição química, do material, da espessura e da forma da peça, da velocidade de esfriamento, agitação do meio e a temperabilidade do aço (CHIAVERINI, 2008).

A forma das peças, como já citado, possui papel fundamental no resfriamento, haja vista, a diferença de esfriamento entre a superfície e o centro das mesmas. Para peças simples de pequena espessura, a variação de temperatura entre a superfície e o núcleo, é mínima (SOARES, 2010).

No entanto, o mesmo não ocorre com peças de maiores espessuras, haja vista, o centro do material tender a esfriar de forma secundária comparada a sua superfície (CHIAVERINI, 2008).

Tal distinção se faz preponderante, à medida que, a seção da peça aumenta e mediante a escolha do meio de resfriamento do qual é dependente de sua velocidade de esfriamento (CHIAVERINI, 1990). A Representação gráfica da diferença de esfriamento entre as seções da peça pode ser entendida na figura 7:

Figura 7– Representação da velocidade de esfriamento da peça em diferentes meios de Resfriamento.



Fonte: Chiaverini (1990, p.51).

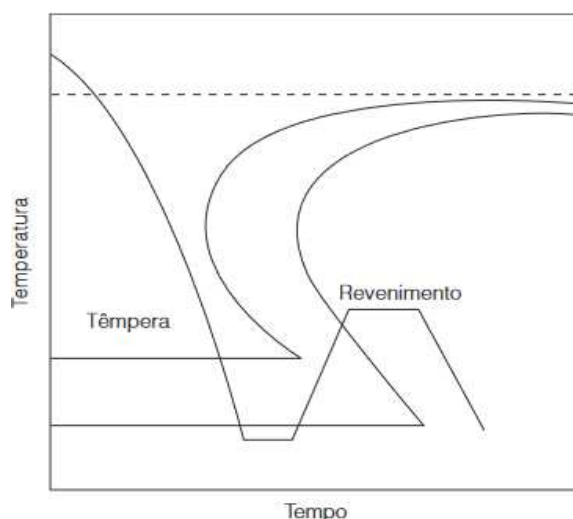
Para um bom êxito nessa etapa crítica, é necessário haver devida agitação da peça em contato com o meio líquido, pois, como mostra (ASM,1991, p.165), “[...] A agitação possui importância fundamental no processo de transferência de calor”.

De fato, o resfriamento ocorre em três estágios principais sendo a 1º a formação de um filme de vapor, a 2º consiste na dispersão das bolhas de vapor sobre a peça, e o 3º estágio consistindo no processo de diferença de temperatura por condução e convecção (COSTA E MEI, 1988).

Dessa forma, a agitação consegue alterar as devidas taxas de transferência de calor, realizando assim, a extinção da camada de vapor existente e formando menores bolhas vaporizadas, melhorando as condições de resfriamento (CHIAVERINI, 2008).

7 Revenimento

Figura 8 – Ciclo Térmico de Revenimento



Fonte: Costa e Mei (2010.p.123).

Durante a Têmpera, o material é submetido a diversas tensões de natureza térmica advindo do meio de resfriamento, e de natureza estrutural, ocasionado pela mudança brusca de fases durante o processo, acarretando assim, na formação de uma microestrutura dura e frágil (COSTA E MEI, 2010).

Muitos aços que passaram por têmpera são, posteriormente, submetidos ao revenido. O resultado deste tratamento, é a formação da martensita revenida que é formada por partículas finas de carbonetos dispersos em uma matriz ferrítica (SAUER, 2023).

O revenimento consiste no reaquecimento do aço em temperaturas inferiores a A_{c1} , com o objetivo principal de aumentar a ductilidade e a tenacidade, além de promover o alívio de tensões e a melhoria da resistência mecânica (COLPAERT, 2008).

7.1 Endurecimento Secundário

Fenômeno presente em aços com presença de elementos de liga dos quais formam carbonetos, como Vanádio (V), Titânio (Ti), Cromo (Cr), Molibdênio (Mo), Nióbio (Nb) ou Tungstênio (W). Neste ensejo, o revenimento ocorre em faixas em torno de 500 °C e 600 °C. Tais carbonetos são considerados mais estáveis comparado a cementita, facilitando assim, a formação dos carbonetos, outrora citados. Este fenômeno é essencial para aplicações em que exigem materiais com alta resistência (SAUER, 2023).

7.2 Fragilidade do Revenido.

Em alguns tipos de aços, há durante o tratamento térmico de revenido, uma queda considerável de dureza. Tal decaimento pode ser explicado através do fenômeno “Fragilidade do Revenido”. Do qual ocorre de acordo com (CHIAVERINI, 2008, p. 81), “[...] Entre 260°C a 370°C, havendo, portanto, um decréscimo nos valores de tenacidade do material, sendo conhecida entre entusiastas do assunto, como fragilidade a 350°C”.

Os aços mais suscetíveis a tal fenômeno são aços ligados ao Cromo, ao Cromo-Manganês, ao Níquel e ao Cromo-Níquel (CHIAVERINI, 1990). Tais fenômenos são muito críticos, pois, como comentam (COSTA e MEI, 1988, p.128), “[...] Estes fenômenos de fragilização são especialmente perigosos, uma vez que nenhuma das propriedades é afetada, só podendo ser detectados com auxílio de teste de impacto “Charpy””.

Uma outra alternativa utilizada, como precaução a fragilidade apontada, no caso de aços revenidos a temperaturas acima de 500°C, é fazer uso do resfriamento em água após o revenido, quando haver questionamentos em relação a propensão a fragilidade do material (COSTA E MEI, 1988).

8 AÇOS FERRAMENTA E AÇOS DE CONSTRUÇÃO MECÂNICA

8.1 Aços Ferramenta

Os aços ferramentas possuem como características principais, dureza elevada como resposta ao tratamento térmico, além de, boa relação de tenacidade e resistência a abrasão. E são caracterizados de acordo com suas respectivas aplicações a seguir (DALLAGO, 2019).

- a) Aços rápidos, ao tungstênio (T), ao molibdênio (M);
- b) Aços para trabalho a quente, ao cromo (H1–H19), ao tungstênio (H20–H39), ao molibdênio (H40– H59);
- c) Aços para deformação a frio, temperáveis em óleo (O), temperáveis ao ar (A);
- d) Aços resistentes a choque (S);
- e) Aços especiais, baixa liga (L), carbono- tungstênio (F), para moldes (P);
- f) Aços temperáveis em água (W).

Esses materiais, a exemplo dos aços AISI D2 e D6, possuem boa temperabilidade, e além disso, é possível a obtenção de alta dureza durante o tratamento, sendo proporcionado a preservação de controle dimensional e de forma das peças. O aço D2 é temperável ao ar por causa de seu teor elevado em molibdênio, possuindo, todavia, excelente resistência a abrasão

devido ao alto volume de carbonetos de cromo em sua estrutura. Exibindo, portanto, mínima distorção após a têmpera (FARIA, 2006). Tal material tornou-se geralmente escolhido devido a combinações de dureza, tenacidade e resistência ao desgaste. (METALS, 2024).

Após o recozimento, o aço D2 pode atingir dureza em torno de 255HB, possuindo em sua composição teores de molibdênio e vanádio da ordem de 1,0% com o intuito de melhorar a resposta ao tratamento térmico (MEDANHA.ET.AL, 2008).

As principais funções dos principais elementos de liga presentes no aço D2, podem ser classificadas como mostra os tópicos seguintes (MEDANHA.ET.AL, 2008):

- a) **Carbono (C):** Elemento químico responsável pela geração do eutético na solidificação, aumento de dureza, através da formação martensítica durante a têmpera e pelo endurecimento secundário presente em determinados intervalos de temperatura durante o revenimento.
- b) **Molibdênio (Mo):** Precipitação de carbonetos secundários em determinados intervalos de temperatura durante o revenido.
- c) **Fósforo (P):** Elemento causador de fragilidade durante o revenido. Seu teor deve ser mantido abaixo de 0,03%.
- d) **Cromo (Cr):** Elemento responsável pela formação do eutético no processo de solidificação, melhora a temperabilidade do aço e a precipitação de estruturas de carbonetos no endurecimento secundário no revenimento.

O aço D6, também chamado de VC-131, trata-se de um aço ferramenta para trabalho a frio, possuindo elevado teor de cromo e carbono, com teores adicionais de Tungstênio e Vanádio, dos quais são responsáveis pela concentração de carbonetos. Apresentando como característica alta resistência mecânica e ao desgaste, sendo caracterizado por sua alta estabilidade dimensional (VILLARES, 2021). No estado de recozimento sua dureza pode alcançar o valor máximo de 250HB (24HRC). Podendo ser submetido ao processo de têmpera para alcance de dureza em torno de 62HRC (SOARES, 2021). Sua aplicação consiste em ferramentas de corte, tal como facas, punções, mandris e etc (METALS, 2024).

As principais funções dos principais elementos de liga do aço D6, consistem em (SOARES, 2021):

- a) **Vanádio (V):** Forma carbonetos sendo classificado o de maior dureza presente nos aços. Ademais, é responsável por melhorar a temperabilidade na classe dos aços ferramentas, através do não crescimento de grão durante o processo de aquecimento para a têmpera.

- b) **Cromo (Cr):** Elemento químico abundante no aço VC-131. É responsável pela melhora da temperabilidade, e da resistência a corrosão no tratamento térmico.
- c) **Carbono (C):** Quando se há elevado teor de carbono, aumenta-se a formação de complexos carbonetos. Resultando, portanto, em dureza elevada e resistência ao desgaste do aço. Devido ao elevado teor de carbono, também se tem uma maior quantidade de austenita retida durante a têmpera. Sendo necessário, dessa forma, maior tempo e temperatura durante o revenimento.

8.2 Aços Baixa liga para Construção Mecânica

No caso da família de aços para Construção Mecânica, há uma divisão em classes, segundo Costa e Mei (1988, p. 447): “[...] Aços para beneficiamento, Aços para Cementação ou Carbonetação e Aços para Nitretação”.

O aço 1045 é um aço para beneficiamento, considerado de baixa temperabilidade (METALS, 2015), de médio carbono, possuindo propriedades mecânicas adequadas, correlacionando boa dureza e resistência mecânica (COPPERMETAL, 2024). Por ser um aço de baixa temperabilidade, a obtenção da estrutura martensítica torna-se mais difícil do que comparado a um material de alta temperabilidade, devido a taxa de resfriamento do aço ser baixa (SILVA.ET.AL, 2019). Aplicação deste material, dentre outros destinos, consiste na fabricação de grampos, parafusos e pinças (METALS, 2015).

O mesmo comentário não pode ser feito para o aço 4340, do qual trata-se, de um aço ligado ao cromo-níquel-molibdênio, possuindo, além de alta temperabilidade, elevada resistência a fadiga, e adequada ligação entre média resistência mecânica e resistência a fratura (METALS, 2015). Destacando-se também sua alta tenacidade e baixos valores de soldabilidade e usinabilidade, podendo ser fornecido em condição recozida com valores de dureza em torno de 260HB (AÇOSPORT, 2024). Seus elementos de liga, como descritos a seguir, melhoram a resposta ao tratamento térmico, além de propiciar melhores características relacionados a resistência mecânica (AÇOSROMAN, 2024).

- a) **Cromo (Cr):** Responsável por atenuar a temperabilidade, resistência a corrosão e a abrasão.
- b) **Níquel (Ni):** Garante boa resistência ao impacto.
- c) **Molibdênio (Mo):** Confere resistência em altas temperaturas.

Sua aplicação consiste em abrangentes setores de atuação, a exemplo da indústria aeronáutica, peças automobilísticas e de máquinas, além de vasos de pressão, dentre outros.

Usualmente, pode ser fornecido em condição recozida com dureza de 260HB (AÇOS FORTE, 2024).

9 TRATAMENTO TÉRMICO DOS AÇOS FERRAMENTA E CONSTRUÇÃO MECÂNICA

9.1 Aço D2

Como já mencionado em parágrafos anteriores, o aço D2 é um aço ferramenta para trabalho a frio, com aplicações em brochas, alargadores, e matrizes para compactadores de pós-metálicos. Possui como características, quando submetidos a têmpera, elevada dureza e resistência ao desgaste (METALS, 2015). Os valores de dureza para tal material variam de 54-61HRC (ASM, 1991). Sua composição química, conforme as normas alemãs DIN e VDEh presentes no manual de composições químicas de aços da empresa Villares Metals, é expresso como mostra a tabela a seguir (Tabela 1).

Portanto, tal material poderá adquirir dureza superficial quando exposto a seguinte etapa de tratamento térmico:

Têmpera: Aquecer lentamente a $T=1040^{\circ}\text{C}$ (CONCI, 2023), $T=1$ hora para cada 25 mm de espessura e adicionar 1 hora para cada 25 mm adicionais (METALS, 2015).
Resfriamento: Ar (ASM, 1991); revenir quando as peças estiverem ainda mornas entre 60°C a 90°C (COSTA E MEI, 1998).

Com o intuito de selecionar temperaturas de austenitizações aplicáveis aos aços D2, foi realizado uma busca comercial, como mostrado a (Tabela 2), visando uma coleta de informações acerca de tal parâmetro, de forma a entender melhor quais os valores de temperatura, atualmente, trabalhados em relação a tal material. Além disso, foi realizado uma comparação com literatura especializada para auxiliar na determinação de tal parâmetro.

Tabela 1 – Composição Química do Aço D2 (% em massa).

C%	Cr%	Mo%	V%	Si%	Mn%	P% _{máx}	S% _{máx}
1,50-1,60	11,0-12,0	0,60-0,80	0,90-1,10	0,10-0,40	0,15-0,45	0,030	0,030

Fonte: Adaptado de Vilares (2010).

Tabela 2 – Valores de temperaturas de austenitizações aplicados em empresas comerciais e referência literária.

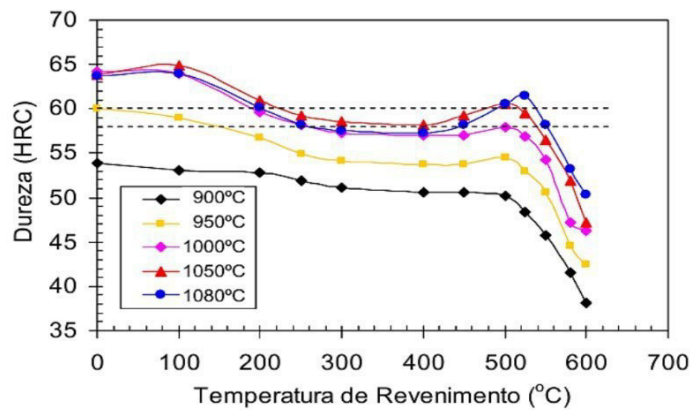
Empresa1	Empresa2	Empresa3	Empresa4	Empresa5	Empresa6	Referência
1020-1040°C	1020-1040°C	980-1020°C	1010°C	1000-1200°C	1000-1040°C	980-1025°C

Fonte: Adaptado de Murano Aços Especiais (2024); GGD Metals (2024); Aços Roman (2024); SHLION Metals (2024). Alfa Metals (2024) WALDEEN Steel (2024); ASM Handbook (1991).

Para durezas em torno de 58-60HRC em amostras de aço D2 com espessura de 19 mm de diâmetro e 4 mm de comprimento, observou-se, que tal intervalo de dureza pode ser atingido quando o material é austenitizado em temperaturas superiores a 1000°C, utilizando revenimentos situados em torno de 200°C, como também, em temperaturas superiores a 500°C, maximizando assim, o potencial de endurecimento secundário do material (CONCI, 2023). Analisando as curvas que relacionam o revenimento com escalas de dureza HRC (Figuras 9 e 10), tem-se como parâmetro a temperatura de 1040°C com previsão de dureza entre 58-60 HRC.

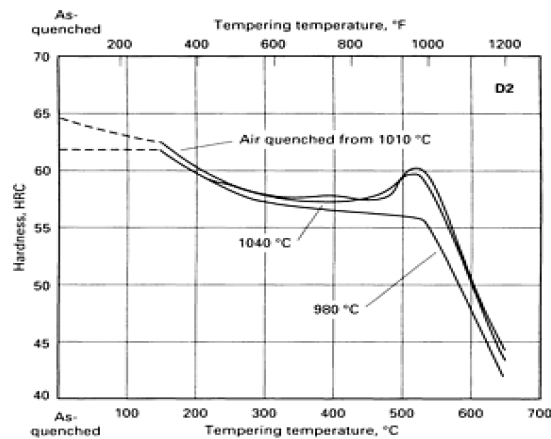
O resfriamento ao ar é resultado da observação citada em (ASM, 1991, p.1626),” Aços do grupo A e D obterão dureza máxima por resfriamento em ar parado, a menos que as seções sejam extremamente grandes”.

Figura 9 – Curvas de revenimento para o aço D2 em diferentes faixas de temperatura



Fonte: CONCI (2023).

Figura 10 – Relação entre temperatura de revenido e dureza para aços ferramenta D2.



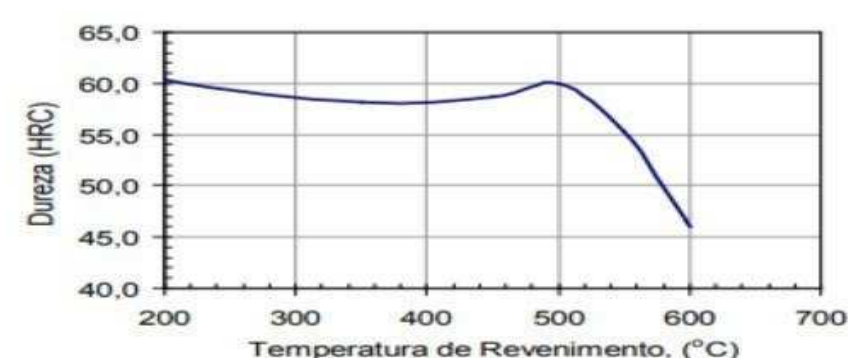
Fonte: ASM Handbook (1991).

Revenido: Revenir em 540°C, Revenimento duplo. T= 2 horas cada. Resfriamento ao ar (ASM,1991).

O processo de revenimento poderá ser realizado promovendo o duplo revenimento sendo seguido de resfriamento intermediário a temperatura ambiente (AÇOS NOBRE, 2024). Conforme cita (ASM,1991, p.1628), [...]” será notado na fig. 7 e 8 que certos aços (notadamente A2 e D2) exibem maior dureza após serem temperados a cerca de 540°C(1000°F) do que após serem temperados de 55 a 110°C (100 a 200F) mais baixas”. Essa reversão na relação usual é conhecida como endurecimento secundário e é causada pela transformação da austenita retida durante o revenimento em temperaturas mais altas perto de 540°C (1000°F), quando um aço pode ser temperado com a mesma dureza em mais de uma temperatura (por exemplo, D2 a 58 a 59HRC), é aconselhável selecionar a temperatura de revenimento mais alta que produzirá a dureza desejada. Isso produzirá maior tenacidade e pode evitar a quebra da ferramenta em serviço (ASM,1991).

Para a confirmação dos valores referentes ao Revenimento, foi utilizado também, a seguinte curva do processo para o aço D2, como mostra a (Figura 11).

Figura 11– Curva de Revenimento para o aço D2.



Fonte: GGD Metals (2015).

9.2 Aço D6

O aço D6 pertencente a série die Steels, dos quais, são caracterizados como aços de alto teor de carbono e de alto cromo, possuindo, portanto, elevada resistência ao desgaste (SOARES, 2021). Sua aplicação consiste na fabricação de facas, tesouras, dentre outros utensílios (METALS, 2015). Possui dureza em torno de até 62HRC após o Tratamento Térmico (CAVALER, 2003). Tal material possui a seguinte composição de teores de elementos de liga,

conforme mostra as normas alemãs DIN e VDEh, presente no manual de composições químicas de aços da empresa Villares Metals (Tabela 3):

Tabela 3 – Composição Química do Aço D6(% em massa).

C%	Si%	Mn%	P% máx	S% máx	Cr%	W%
2,00-2,25	0,10-0,40	0,15-0,45	0,030	0,030	11,0-12,0	0,60-0,80

Fonte: Villares (2010).

Tal material poderá adquirir dureza superficial quando exposto a seguinte etapa de tratamento térmico:

Têmpera: Aquecer entre 950 e 970°C (SILVEIRA.ET.AL.,2018), T=1 hora para cada 25mm de espessura e adicionar 1 hora para cada 25 mm adicionais (METALS, 2015). Resfriamento: Óleo (ASM, 1991) ou ar (SERRAMETAL, 2024). Quantidade: 10 Litros para cada kg de aço (PRABHUDEV, 1998). t= 8-10s (ASM, 1991). Temperatura: Óleos rápidos: 60°C (ASM, 1991).

Segundo levantamento feito em 6 empresas do ramo metalomecânico, além de buscas em literatura especializada, a temperatura ideal de austenitização para o aço D6, consistiu nos seguintes valores (Tabela 4):

Tabela 4 – Consulta de temperaturas de austenitizações em diferentes empresas e comparação com a literatura especializada.

Empresa1	Empresa2	Empresa3	Empresa4	Empresa5	Empresa6	Referência
950-970°C	950-970°C	930-970°C	960-1000°C	950-970°C	950-970°C	930 e 950°C

Fonte: Adaptado de Murano Aços Especiais (2024); Maxime Ferrum (2024); AçosRoman (2024); Rodman Aços (2024); SerraMetal (2024); GGD Metals (2024); ASM Handbook (1991).

Comparando o que mostra a consulta acima em relação a referências especializadas no assunto bem como o que mostra (SILVEIRA.ET.AL.,2018) “[...]O aço VC 131 quando exposto a temperatura de têmpera por volta de 950°C e 970°C para atingir a austenitização e resfriado bruscamente conforme indicação do fabricante para formara austenita (William Chandler -Roberts-Austen (1843-1902)), transforma-se em martensita, que confere uma primeira dureza de 63-64 HRC.

O processo pode ser realizado entre temperaturas de 930°C e 950°C, para ferramentas com dimensões de até 25mm (SANTOS, 2022).

Na etapa de resfriamento, o aço D6, é resfriado preferencialmente, em óleo (ASM, 1991). Porém, como meio alternativo, também, poderão ser endurecidas ao ar (SERRAMETAL, 2024). No que tange a quantidade de óleo necessário para a operação de

tratamento térmico, baseia-se, conforme mostra (PRABHUDEV, 1988, p.95), [...]” Em cerca de 10 litros de óleo para cada quilograma de aço”

O tempo necessário relativo à permanência do material a exposição ao meio de resfriamento, pôde ser entendido através da seguinte (Tabela 5).

Tabela 5 – Relação entre tempo de resfriamento e Classificação do óleo.

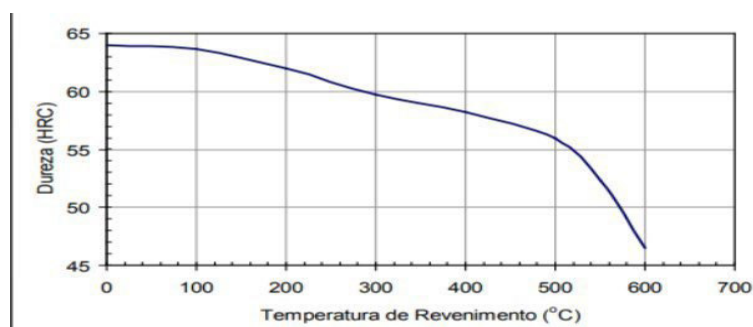
Classificação do Óleo	Tempo de Resfriamento(s)
Rápido	8-10
Médio	11-14
Lento	15-20

Fonte: Adaptado de ASM Handbook (1991).

Revenimento: Revenir quando as peças estiverem ainda mornas entre 60°C a 90°C (COSTA E MEI, 1998). Revenir entre 100°C e 200°C (CHIAVERINI, 2008), Revenimento duplo.2 horas cada, resfriamento ao ar (METALS, 2015).

Para a determinação dos valores referentes ao Revenido, foi utilizado a seguinte curva do processo para o aço D6(Fig.12), como também a tabela de dureza relacionada com a devida temperatura de revenimento fornecida pela empresa aços nobres. como mostra a (Figura 13).

Figura 12 – Curva De Revenimento do Aço D6



Fonte: GGD Metals (2015).

Figura 13 –. Correlação entre temperatura de revenimento e durezas HRC.

Temperatura (°C)	100	200	300	400	500	600
Dureza (HRC)	63	62	60	58	56	48

Fonte: Aços Nobre (2024).

A temperatura de revenimento do aço D6, gira em torno do intervalo de 100°C a 200°C. O intuito da exposição do material a esse intervalo de referidas temperaturas, é promover a precipitação dos carbonetos de liga, tipo épsilon, podendo proporcionar uma queda de dureza em torno de 60 HRC. A referida temperatura, também, foi escolhida através da análise, da curva de revenimento do aço (Fig.12), onde a mesma mostra intervalos de dureza maiores da ordem de 60 a 65 HRC. Podendo, tal intervalo, ser justificado através das temperaturas de revenimento

para o aço D6, segundo a empresa Aços nobre (Fig.13), da qual, aponta uma previsão de dureza da ordem de 62HRC.

9.3 Aço 1045

Como já discutido, o aço 1045 é um aço de beneficiamento, com médio percentual de carbono, de baixa temperabilidade, com propriedades mecânicas medianas. Possuindo boa correlação entre resistência mecânica e a fratura (SILVA, 2021). Sua aplicação consiste, dentre outros produtos, na fabricação de cilindros, ferrolhos e parafusos (METALS, 2015). Segundo a empresa Marvitubos, tal material pode alcançar uma dureza de até 55HRC, após Tratamento Térmico. Sua composição química está de acordo com o que mostra a norma SAE J403h do manual de composições químicas de aços da empresa Villares Metals (Tabela 6).

Tabela 6 – Composição Química do aço SAE 1045 (% em massa).

C%	Mn%	P% máx	S% máx
0,43-0,50%	0,60-0,90%	0,040%	0,050%

Fonte: Villares (2010).

Tal material poderá adquirir dureza superficial quando exposto a seguinte etapa de tratamento térmico:

Têmpera: Aquecer em 900°C (SILVA, 2021), T=1h para cada 25 mm de espessura (METALS, 2015). Resfriamento: Água, t= 5-20s, dependendo da seção da peça (ASM, 1991). T= 15°C a 25°C (ASM, 1991). O resfriamento poderá ocorrer em meios alternativos, como óleo, por exemplo (AÇOS NOBRE, 2024).

Segundo como mostra o trabalho de (SILVA, 2021, p .32),” [...]A microscopia óptica de uma amostra submetida ao procedimento de têmpera em água apresentou microestrutura martensítica em formato de agulha”. Tal metodologia, utilizadas em amostras de 1,20cm de diâmetro, poderá ser entendida através da seguinte micrografia (Figura 14).

Figura 14 – Imagem em Microscopia Óptica do Aço 1045 Temperado em água. Martensitas em marcação vermelha (aumento de 200x).



Fonte: Silva (2021).

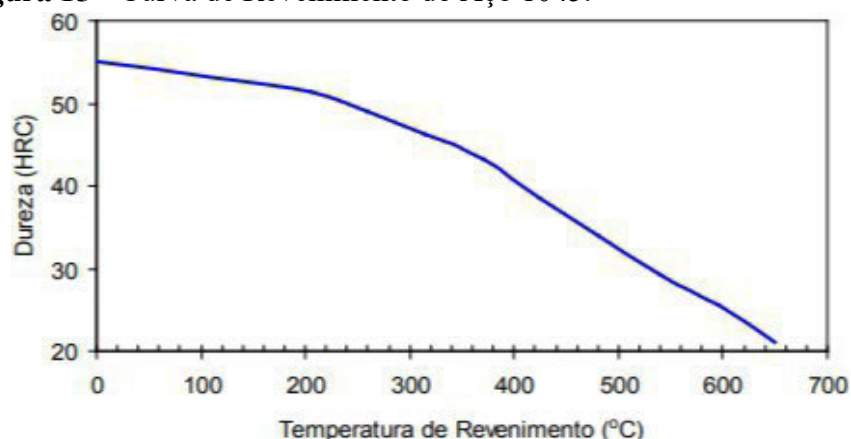
Em relação aos parâmetros relativos ao resfriamento em água, outrora citado, foi considerado a seguinte passagem de (ASM, 1991, p.218), [...]” A água fornecerá velocidade de têmpera uniforme e resultados reproduzíveis se mantida numa temperatura de 15° a 25°C (55° a 75°F)

Os valores referentes ao tempo de permanência do material no meio de resfriamento, foram extraídos através da seguinte passagem como cita (PRABHUDEV, 1988, p.73), [...]” Ferramentas feitas de aço carbono ou liga de carbono são mergulhadas em água por 5 a 20 segundos, dependendo do seu tamanho, até que sua superfície fique escura.”

Revenido: Revenir quando o material atingir 70°C. T=100°C a 250°C (CHIAVERINI, 1990), durante min. 2 horas (METALS, 2015), seguindo a relação 1h para cada 25 mm de espessura com adicional de 1 hora para cada 25 mm adicionais, com posterior resfriamento ao ar (METALS, 2015).

Para a determinação dos valores referentes ao revenimento, foi utilizado a seguinte curva do processo para o aço 1045 (Figura 15).

Figura 15 – Curva de Revenimento do Aço 1045.



Fonte: GGD Metals (2018).

A temperatura para revenimento gira em torno de 100° e 250°C. Sendo entendível, mediante análise da fig.15, a correspondências de durezas mais elevadas na ordem de 50 a 55 HRC. Em adição a este fato, um dos maiores benefícios dessa temperatura de trabalho é o alívio de tensões, com conseguinte, precipitação de carbonetos. Não submetendo o material a maiores temperaturas elevadas sem mudanças estruturais sensíveis (CHIAVERINI, 2008).

9.4 Aço 4340

O aço 4340 é um aço para beneficiamento ligado ao cromo, níquel, molibdênio, de alta temperabilidade (METALS, 2018). Sua aplicação consiste na fabricação de determinados componentes dos quais exigem boas relações entre resistência mecânica média e resistência a

fratura. Sua dureza na condição temperada varia entre 54 e 59 HRC (PKM Aços, 2024). Tal material possui a seguinte composição química segundo a norma SAE J404j presente no manual de composições químicas de aços da empresa Villares Metals (Tabela 5):

Tabela 7 – Composição Química aço 4340(% em massa)

C%	Mn%	Si%	Ni%	Cr%	Mo%
0,38-0,43	0,60-0,80	0,15-0,30	1,65-2,00	0,70-0,90	0,20-0,30

Fonte: Villares,2010.

Portanto, tal material poderá adquirir dureza superficial quando exposto as seguintes etapas de tratamentos térmicos:

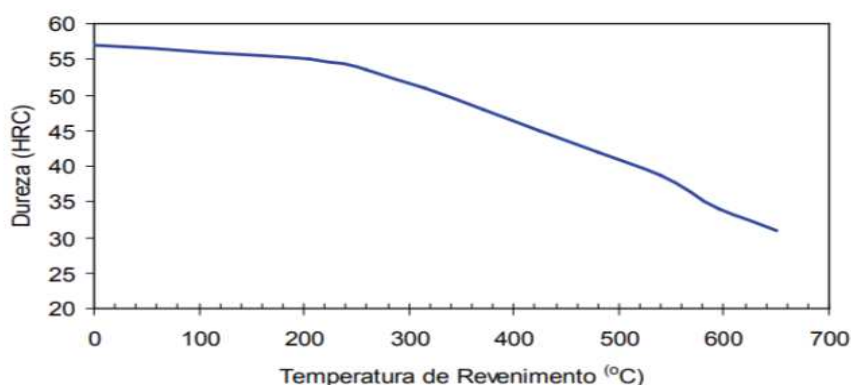
Têmpera: Aquecer em 860°C (COBEF, 2017), T=1h para cada 25mm de espessura e adicionar 1 h para cada 25 mm adicionais (METALS, 2015). Resfriamento: Óleo rápido: T=60°C (ASM, 1991), t= 8-10s (ASM, 1991), Volume= 10 litros para cada kg de aço (PRABHUDEV, 1988). De forma alternativa, o resfriamento poderá ocorrer em outros meios como a água, por exemplo, sendo dependente da forma da peça, bem como a dureza necessária a ser adquirida. (AÇOS NOBRE, 2024).

Um aço 4340 em formato redondo com 112 mm de diâmetro, quando austenitizado, na referida temperatura, outrora citada, e resfriado em óleo, apresentará estrutura martensítica com formato pontiagudo assemelhando-se a agulhas, com dimensões de 20mm (COBEF, 2017).

Revenido: Revenir quando as peças atingirem 70°C (METALS, 2024), T= 100 e 250°C (CHIAVERINI, 1990), Tempo=Min. 2horas (METALS, 2015), seguindo o tempo de 1 hora para cada 25 mm de espessura com adicional de 1 hora para cada 25 mm adicionais (METALS, 2024)

Para a determinação dos valores referentes ao Revenimento, foi utilizado a seguinte curva do processo para o aço 4340(Fig.14), como mostra a seguir:

Figura 16 – Curva De Revenimento do aço 4340



Fonte: GGD Metals (2018).

A curva de revenimento do aço 4340 (Fig.16) demonstra que os intervalos entre 100°C e 250°C proporcionam melhores valores de dureza a peça, atingindo durezas entre 55HRC e 57

HRC. Promovendo, a essa temperatura, o aparecimento da martensita revenida, além da, precipitação de carbonetos do tipo épsilon, com conseguinte, alívio de tensões residuais (CHIAVERINI, 2008).

10 MATERIAIS E MÉTODOS

10.1 MATERIAIS

Foram utilizados dois aços ferramentas para trabalho a frio D2 e D6, e dois aços de Construção Mecânica 1045 E 4340 (Fig.17).

Figura 17– Amostra dos Aços Ferramentas D2 e D6 e Construção Mecânica 1045 e 4340.



Fonte: Próprio autor

10.2 MÉTODOS

10.2.1 Corte Cutt Off das amostras

Primeiramente foram realizadas o corte Cutt-Off das amostras dos aços D2, D6, 1045 e 4340.

10.2.2 Revisão Bibliográfica

Após o corte das amostras dos aços como objeto de estudo, foi realizado, a fim de encontrar, formas viáveis, de como tratar termicamente tais materiais, visando obtenção de dureza ,uma revisão bibliográfica em livros especializados em tratamento térmicos, entre elas, Metals Handbook Heat Treatment volume 4(ASM International, 1991), Tratamento Térmico de Ligas Metálicas(ABM, 2008), Aços e ligas especiais(Blucher, 2010), Aços e Ferros fundidos (1990),Handbook of Heat Treatment of Steels(McGraw-Hill, 1988), artigos como”Soldagem TIG aplicado na recuperação de matrizes de corte de aço VC-131 temperado(Ciências Exatas, 2018)”, monografias, como as de (Silva, 2021), tese de doutorado como a de (Concil, 2023), além de buscas em guias de composição química dos aços conforme mostra manual de composição química da empresa Villares Metals, em adição a buscas em sites comerciais de empresas como a PKM aços, Aços nobre e GGD Metals, SerraMetal, AçosNobre, AçosRoman, Shilion Metal, Alfa Metais, Waldeen Steel, Maxime Ferrum, Murano Aços Especiais e Rodman Aços. Tal pesquisa, busca estabelecer informações normativas acerca da composição química dos aços em estudo, bem como, promover a comparação entre os parâmetros de trabalho em

relação a têmpera e revenimento. De modo a determinar Temperatura de austenitização, Tempo de exposição a temperatura de austenitização, seleção do meio de resfriamento, Tempo de exposição ao meio de resfriamento, Temperatura do meio de resfriamento, Quantidade, em litros, do meio de resfriamento, Temperatura de revenido e Tempo de exposição a temperatura de revenido. Promovendo assim, uma comparação, entre o que é recomendado de forma teórica, em literaturas especializadas para o tratamento dos aços estudados nessa monografia, e o que é reproduzido de forma prática por empresas que realizam, práticas de Têmpera e Revenido, nos materiais em estudo.

10.2.3 Preparação para os Testes de Composições Químicas.

Lixamento

Todo o lixamento das amostras de aço D2, D6, 1045 e 4340 para a realização dos testes de composições químicas foi realizado em lixas de 100 mesh.

10.2.4 Testes de Composições Químicas.

Os testes de composições químicas para as amostras dos aços D2 e D6, foram realizadas no Laboratório de Pesquisa, Tecnologia e Soldagem da Universidade Federal do Ceará, através do espectômetro de emissão óptica Bruker AXS. Ademais, para as amostras de 1045 e 4340, o referido teste foi realizado no Laboratório de Caracterização de Materiais da mesma universidade, utilizando o espectômetro de emissão óptica Shimadzu PDA 7000.

10.2.5 Preparação Metalográfica.

Visando a microscopia dos aços ferramentas D2 e D6, foi realizado o lixamento de tais amostras em lixas de 100, 220, 320, 450, 600 e 2000 mesh.

10.2.6 Polimento

As amostras dos aços D2 e D6 foram polidas em pastas de diamante em seqüências de 6,3 e 1 micra.

10.2.7 Ataque

As amostras dos aços D2 e D6 foram atacadas com reagente nital a 2%, sendo 2% de ácido nítrico e 98% de álcool 98. Com tempo de ataque de 3 segundos.

10.2.8 Microscopia Óptica

Após o processo de preparação metalográfica dos aços D2 e D6, tais amostras foram levadas ao microscópio óptico do Laboratório de Caracterização de Materiais da UFC, para a geração de suas devidas microscopias.

10.2.9 Microscopia Eletrônica de Varredura

Logo após a etapa de Microscopia Óptica, foi realizado a análise MEV das amostras dos aços D2 e D6 na Central Analítica da Universidade, com o intuito de revelar e confirmar as microestruturas geradas através das microscopias ópticas de tais aços. Promovendo, em melhores ampliações, a superfícies de tais materiais, gerando, portanto, as micrografias das amostras em questão.

11 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como resultado, dos testes de Composições Químicas, foram obtidos os seguintes teores de elementos de liga para as amostras dos aços D2 (Tab.8), D6(Tab.9), 1045(Tab.10) e 4340 (Tab.11), como mostrado a seguir.

Tabela 8 – Composição Química do Aço D2

C%	Cr%	Mo%	V%	Si%	Mn%	P%	S%
1.521	11.43	0.870	0.803	0,548	0,331	<0.0010	<0.0050

Fonte: Laboratório de Caracterização de Materiais, UFC.

Tabela 9 – Composição Química do Aço D6

C%	Cr%	W%	Si%	Mn%	P%	S%
2.051	12.38	0.661	0.370	0.325	<0.0010	<0.0050

Fonte: Laboratório de Caracterização de Materiais, UFC.

Tabela 10 – Composição Química do Aço 1045.

C%	Mn%	P%	S%
0.52	0.66	0.015	0.015

Fonte: Laboratório de Caracterização de Materiais, UFC.

Tabela 11 – Composição Química do aço 4340.

C%	Mn%	Si%	Ni%	Cr%	Mo%
0.481	0.671	0.283	1.798	0.8236	0.279

Fonte: Laboratório de Caracterização de Materiais, UFC.

Com base nos resultados apontados através dos testes de composições químicas, foi possível constatar que, as amostras dos aços D2 e D6, constitui-se, de fato, em dois aços ferramenta para trabalho a frio de alto cromo e alto carbono. Tendo seus teores de elementos de liga compatíveis com o que mostra a designação normativa alemã Din e VDeh, sendo a nomenclatura X155 CrVMo12 1, correspondendo ao aço D2 e X210 CrW12, correspondente ao aço D6. Os aços 1045 e 4340 apresentaram teores de elementos químicos dentro dos padrões da norma SAE, sendo, portanto, classificados como aços de construção mecânica.

Como forma de comparar os resultados apontados pelos testes de composições químicas, nos aços X155 CrVMo12 1 e X 210 CrW 12, bem como, investigar a natureza microestrutural de tais materiais, conforme recebido, foram realizadas microscopias ópticas e eletrônicas de varredura em amostras de tais aços.

O aço D2 apresentou, em sua microestrutura, conforme fig (A), regiões ferríticas (regiões claras) e presença de carbonetos de cromo, em sua maioria globular, apresentando, todavia, formatos maiores e alongados (regiões escuras), porém, menores que os carbonetos presentes na microestrutura do aço D6. Tais carbonetos estão distribuídos ao longo de toda a matriz de forma uniforme, e apresentando aspecto não isolado. É possível, também visualizar, pontos ainda menores de coloração mais clara, comparados a carbonetos maiores presentes na mesma microscopia.

A presença de carbonetos menores (carbonetos secundários) na microestrutura do aço D2, advém conforme (CONCI, 2023, p.79)” [...] De Rupturas de carbonetos, da qual, é promovida durante a conformação por laminação a quente, gerando maior deformação que causa a ruptura de rede, tornando assim, menores os tamanhos de carbonetos, promovendo melhor distribuição na matriz”.

A distribuição dos carbonetos no aço D2, variam de acordo com a dimensão do material, sendo tamanhos médios e máximos dos carbonetos aumentando de acordo com as dimensões do material (MEDANHA.ET.AL, 2003).

As micrografias geradas pela microscopia eletrônica de varredura do aço D2, fig (C e D), confirmam em maiores ampliações, as microestruturas geradas na microscopia óptica do referido aço. As micrografias exibem a presença de carbonetos eutéticos (bolhas grandes) e pequenos fragmentos de carbonetos secundários (pontinhos menores), em diferentes formatos, distribuídos na matriz principal.

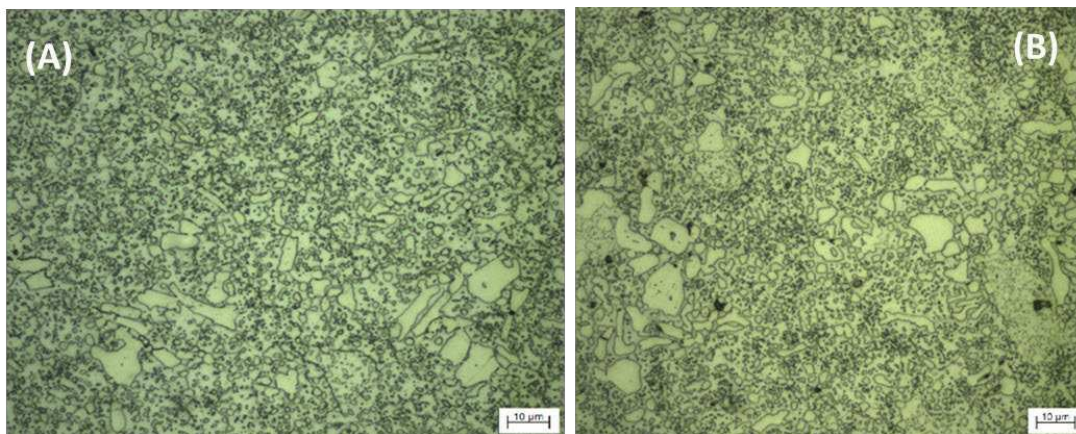
Tais carbonetos apresentam reticulado hexagonal, possuindo dureza em torno de 1600 HV, com características de resistência a dissolução em temperaturas elevadas, sendo extremamente duro e abrasivo. As microestruturas encontradas em microscopias do aço D2 (fig.A), são encontradas, geralmente, em ligas de cromo quando revenidos em altas temperaturas ou recozidos por longos tempos (GOBBI, 2009). Esse fato vai de encontro com a condição atual de fornecimento do aço, comprovando que o mesmo foi recozido.

O aço D6 possui, em sua microestrutura, conforme mostra microscopia óptica (fig.B) a presença de carbonetos de cromo formados por carbono e cromo (pontos escuros). Tais carbonetos se apresentam em tamanhos maiores, de diferentes formatos, situados de forma mais isolada

uns dos outros, sendo distribuído de forma uniforme na matriz ferrítica. A referida microscopia apontou, todavia, para a existência de pontos mais claros, do qual como mostra (SOARES,2021, p.21),” [...] A existência, além de carbono, da presença do elemento químico Tungstênio (W), dando uma indicação que, se tratam de carbonetos gerados pelo metal citado”.

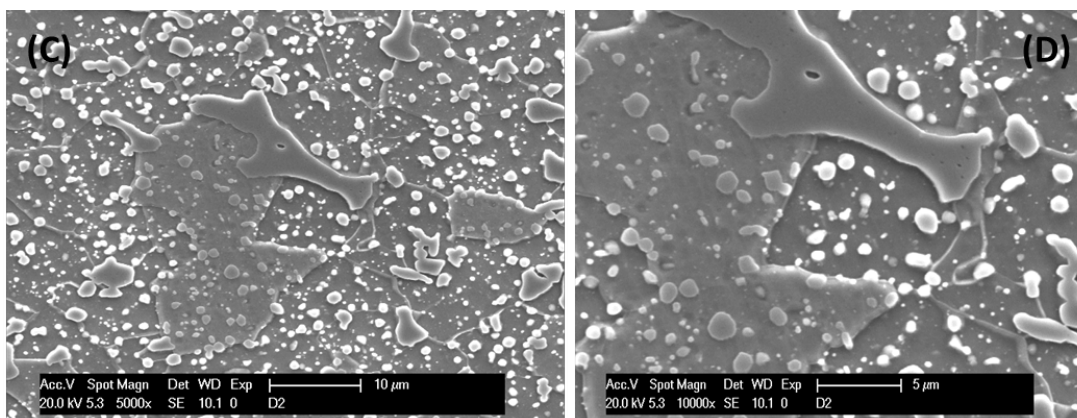
As micrografias (E e F), geradas através da microscopia eletrônica de varredura (MEV), confirmam a informação, outrora, citada. As respectivas micrografias mostram, em maiores ampliações, a presença de estruturas maiores, sendo relacionadas a presença de área rica em cromo e carbono, em adição a pontinhos menores, de coloração mais esbranquiçada sendo formado pelos elementos carbono e tungstênio (W), situados de maneiras mais próximas aos carbonetos maiores, sendo também, distribuídos de forma uniforme na matriz ferrítica. As microestruturas apontadas tanto pela microscopia quanto pela micrografia, sugerem que as amostras do aço D6, foram também, submetidas a processos de recozimento. E que, além disso, o tamanho e a distribuição desses carbonetos, exercem uma forte influência na tenacidade do respectivo aço, ou seja, carbonetos menores e melhores distribuídos na matriz ferrítica, acarretam em melhorias na resistência a fadiga do aço.

Figura 18 – Microscopia Óptica do aço AISI D2 (A) e Microscopia Óptica do aço AISI D6 (B)



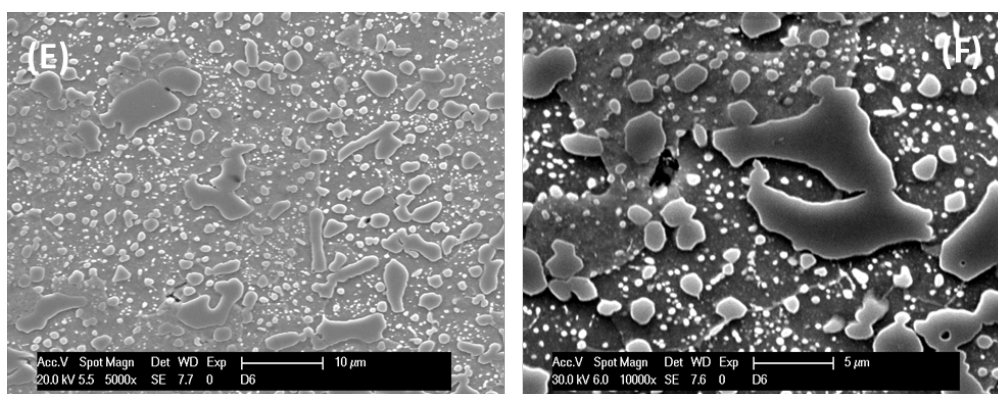
Fonte: O próprio autor

Figura 19 – Micrografia eletrônica de varredura do aço D2 (C) e Micrografia Eletrônica de Varredura - Aço D2 (D)



Fonte: O próprio autor

Figura 20 – Micrografia Eletrônica de Varredura- Aço D6 (E) e Micrografia Eletrônica de Varredura - Aço D6 (F)



Fonte: O próprio autor

De forma geral, a pesquisa realizada nesta monografia, promoveu maior entendimento das aplicações dos aços-ferramenta e de construção mecânica, determinando sequências de têmpera e revenimento das quais poderão, mediante cumprimentos das características a seguir, ser obtidos algum grau de dureza nos materiais.

O Tratamento Térmico de Têmpera e Revenimento, para o aço D2, pode ser realizado em temperaturas de austenitização de 1040°C, aplicado para ferramentas de 19 mm de comprimento e 4mm de espessura, seguindo a relação de 1 hora para cada 25 mm de espessura, em adição, a 1 hora para cada 25 mm adicionais, sendo o resfriamento realizado ao ar, até que se atinja temperaturas entre 60°C a 90°C, sendo seguido da prática de revenimento duplo em temperaturas de 540°C, durante 2 horas cada, com o intuito de obtenção de dureza da ordem de 58-60HRC, com resfriamento posterior, ao ar.

O Tratamento Térmico de Têmpera e Revenimento, para o aço D6, pode ser realizado em temperaturas de austenitização de 952°C, com resfriamento principal, ocorrendo em óleo para amostras de dimensões de até 25 mm, sendo também, passível de ser tratado, de forma alternativa, ao ar. A temperatura do meio de resfriamento é de 60°C, para óleos rápidos, com tempo de permanência de 8 a 10 segundos. A quantidade utilizada deve ser de 10 Litros de óleo para cada quilograma de aço, sendo revenido, assim que as peças atinjam temperaturas entre 60°C a 90°C. Proporcionando revenimento duplo, durante duas horas cada, em temperatura dentro do intervalo de 100°C e 250°C, para durezas em torno de 62-63HRC, com resfriamento posterior ao ar.

O Tratamento Térmico de Têmpera e Revenimento, para o aço 1045, pode ser realizado em temperaturas de austenitização de 900°C, com tempo de exposição de 1 hora para cada 25 mm de espessura com adição de 1 hora para cada 25 mm adicionais, sendo resfriado, preferencialmente, em água, utilizando materiais com dimensões de 1,20 cm de diâmetro, sendo passível, também, o resfriamento em óleo. A temperatura da água deverá ser situada entre 15°C a 25°C, com tempo de exposição ao meio de resfriamento de 5 a 20 segundos, sendo logo após, as peças atingirem a temperatura de 70°C após o resfriamento, submetidos ao revenimento em temperaturas de 100°C e 250°C para durezas em torno de 50-55Hrc, seguindo o tempo de 1 hora para cada 25 mm de espessura, com tempo mínimo de 2 horas, promovendo, resfriamento em ar calmo.

O Tratamento Térmico de Têmpera e Revenimento, para o aço 4340, pode ser realizado em temperatura de austenitização em torno de 860°C, com tempo de exposição a temperatura de 1 hora para cada 25mm de espessura com adição de 1 hora para cada 25 mm de espessura adicional. Sendo resfriado, preferencialmente, em óleo rápido(60°C), utilizando materiais com dimensões de 112 mm de espessura, sendo passível de ser resfriado também em água. A quantidade ideal do meio de resfriamento utilizado é de 10 litros de óleo para cada kg de aço. Com tempo de exposição ao meio de resfriamento em torno de 8 a 10 segundos. Sendo revenido iniciado assim que as peças atinjam a temperatura de 70°C. O Intervalo de temperatura de revenimento se situa entre 100°C e 200°C para durezas em torno de 55HRC até 57HRC (Curva de Revenimento do aço), com tempo de exposição de 1 hora para cada 25 mm de espessura, sendo utilizado por no mínimo duas horas, com posterior resfriamento ao ar.

12 CONCLUSÃO

Através do estudo apresentado, foi possível, conhecer a aplicação dos aços-Ferramenta e de Construção Mecânica, bem como, traçar sequências de Tratamento Térmico aplicado aos aços D2, D6, 1045 e 4340, visando a produção de ferramentas de alta resistência ao desgaste mecânico.

Os testes de composições químicas, bem como, as microscopias ópticas e de varredura, confirmaram a natureza elementar e microestrutural dos materiais cedidos por um fornecedor de Fortaleza. Foi possível, dessa forma, obter-se uma maior segurança acerca da qualidade e da procedência do material para aplicações em tratamento térmico.

Os testes de composições químicas comprovaram que os teores dos elementos de liga presentes nas amostras dos aços, em estudo, estão dentro de normas padronizadas internacionais sendo caracterizados, de fato, como dois aços-ferramenta e de construção mecânica. As microestruturas dos aços D2 e D6, estão compatíveis com estruturas advindas de processos de recozimento, correspondendo o que é mostrado pelo certificado de qualidade dos materiais.

REFERÊNCIAS

AÇOS NOBRE. **Aço 1045: Tudo o que você precisa saber!**.2024.Disponível em: <https://acosnobre.com.br/acos-e-ferros/aco-ferramenta/>. Acesso em: 25 maio.2024.

AÇOS NOBRE. **Aço 4340: Propriedades, Tratamento Térmico e preço.**2024. Disponível em: <https://acosnobre.com.br/acos-e-ferros/aco-ferramenta/>. Acesso em: 25 maio.2024.

AÇOS NOBRE. **Aço Ferramenta-Resistente a temperaturas extremas.** 2024.Disponível em: <https://acosnobre.com.br/acos-e-ferros/aco-ferramenta/>. Acesso em: 25 maio.2024.

AÇOSPORTE. **Aço SAE 1045.** 2011. Disponível em: <https://www.acosporte.com.br/aco-sae-4340>. Acesso em: 23 abril.2024.

AÇOSROMAN. **Aço SAE 4340.** 2024. Disponível em: <https://aco.com.br/aco/sae-4340-aco-carbono-cromo-niquel-molibdenio/>. Acesso em: 25 abril.2024.

ALFAMETALS. **AISI D2 (Aço para Trabalho a Frio).**2024. Disponível em: <https://www.alfametals.com.br/produtos/aco-ferramenta/>. Acesso em 25 abril.2024.

ANASTÁCIO, Andrey Pompeu. **Influência dos diferentes tratamentos térmicos a 900° C nas variações microestruturais produzidas no Aço SAE 4320.** 2020. Trabalho De Conclusão De Curso – Centro De Tecnologia, Universidade Federal Do Ceará, Fortaleza,2020

ASM, **Heat Treating Handbook**, Vol.4. USA: ASM International,1991. Blucher, 2008.

CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução.** 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

CALLISTER, William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** LTC, 2013.

CHIAVERINI, V. **Tratamento Térmico de Ligas Metálicas.** São Paulo: ABM, 2008.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**. São Paulo: ABM, 1990.

COLPAERT, Hubertus et al. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. Editora

CONCI, Maycoln Depianti. **Estudo dos efeitos de ciclos térmicos de revenimento e super-revenimento em tempos curtos no aço ferramenta para trabalho a frio AISI D2**. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade de Campinas. Campinas, 2023.

COPPERMETAL, **Blog Aço SAE 1045**. Disponível em: <https://www.coppermetal.com.br/blog/aco-sae-1045/>. Acesso em: 13 jun. 2024.

DALLAGO, Lucas. **Análise da resistência a corrosão em aços ferramenta**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2022.

DE CESARO CAVALER, Luiz Carlos. **Fresamento periférico do aço AISI-SAE D6 temperado e revenido utilizando fresas de metal-duro**. 2003. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina -Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. 2003. Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFSC_cd75dd1a6c951b4b89510957999da633. Acesso: 17 de junho de 2024.

ECHEVERRI, EDWAN ANDERSON ARIZA. **Análise Numérica e Experimental das Tensões Residuais Geradas Durante o Processo de Têmpera de Cilindros de Aço AISI 1045, 4140 e 4340**. Universidade de São Paulo, p. 58, 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo, 2012.

FARIA, Miguel Nelson de Aguiar Mendes *et.al.*, **Tratamentos térmicos de têmpera em vácuo e em óleo de aços AISI H13 e D2**. 2006. *In*: Faria, Miguel Nelson Aguiar Mendes. Online.

FONSECA, Marcelo Gautério et al. **Redução do percentual de austenita retida pelo processo de shot peening**. Rio de Janeiro:2021.Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/bZKn7XgWR4XZ58b7PGTmftF/?lang=pt>. Acesso em 13 de agosto de 2024.

GOBBI, Silvio José. **Influência do tratamento criogênico na resistência ao desgaste do aço para Trabalho a frio AISI D2**. 2009.Orientador: Dr. José Alexandre Araújo.2009.Dissertação (Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas) - Faculdade de Tecnologia. Universidade De Brasília. Brasília,2009.

INTERLLOY.**D2 Tool Steel (X153CrMoV12)**.2011.Disponível em: <http://www.interlloy.com.au/our-products/tool-steel/d2-tool-steel-x153crmov12/>. Acesso em: 15 jun.2024.

INTERLLOY.**D6 Tool Steel (X210CrW12)**.2011.Disponível em: <http://www.interlloy.com.au/our-products/tool-steel/d2-tool-steel-x153crmov12/>. Acesso em: 15 jun.2024.

MARTINS, Jackson Gurgel. **Análise da influência de tratamentos térmicos em diferentes temperaturas de solubilização e envelhecimento na microestrutura e dureza de aços maraging classe 300**. 2018.Trabalho De Conclusão De Curso – Centro De Tecnologia, Universidade Federal Do Ceará, Fortaleza,2018.

MARVITUBOS. **SAE 1045 - Aço Retificado Temperado por Indução e Cromado**. 2024. Disponível em: https://www.marvitubos.com.br/imagem_texto/20230525_142944_norma-acosae1045retcrom.pdf . Acesso: 26 de junho de 2024

METALS.**GGD D6**. 2015.Disponível em: <https://www.ggdmetals.com.br/produtos/ggd-d2>. Acesso em: 20 abril.2024.

MAXIMEFERRUM.**AçoD6**.2024.Disponível em:<https://maximeferrum.com.br/aplicacoes/MF-D6.pdf> . Acesso em: 30 novembro.2024.

METALS. **GGD1045**. 2018. Disponível em: <https://painel.ggdmetals.com.br/files/upload/pdf/ggd-1045.pdf>. Acesso em: 22 abril, 2024

METALS, **GGD 4340**. 2018. Disponível em: <https://www.ggdmetals.com.br/produtos/ggd-d2>. Acesso em: 22 abril. 2024.

METALS, GGD. **Manual de aços**. Blog GGD. Disponível em: <https://www.ggdmetals.com.br/>. Acesso em: 13 abr. 2024.

METALS, VILLARES. **VC 131 Aço Ferramenta para trabalho a frio**. 2010. Disponível em: [https://www.villaresmetals.com.br/villares/pt/Produtos/Acos-Ferramenta/Trabalho-a-frio/VC131/\(access\)/mobile/](https://www.villaresmetals.com.br/villares/pt/Produtos/Acos-Ferramenta/Trabalho-a-frio/VC131/(access)/mobile/). Acesso em: 3 jan. 2024.

METALS, **GGD D2**. 2015. Disponível em: <https://www.ggdmetals.com.br/produtos/ggd-d2>. Acesso em: 20 abril. 2024.

METALURGIA. **O universo do Tratamento Térmico - Como surgiu essa solução milenar, diferentes tipos de materiais, regulamentações e o aperfeiçoamento na indústria com soluções inteligentes**. Disponível em: <https://www.metalurgia.com.br/noticias-tratamento-termico/>. Acesso em: 21 set. 2024.

MINAYA HUAMÁN, Raúl. **Avaliação do tratamento criogênico na desestabilização da austenita retida no aço AISI D2**. 2017. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo- Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/22104> . Acesso em 24 de junho de 2024.

PKMAÇOS. **Aço 4340**. 2024. Disponível em: <https://www.pkmacos.com.br/aco-4340>. Acesso em 26 maio. 2024.

PRABHUDEV, K. H. **Handbook of Heat Treatment of Steels**. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 1988.

RODMAN AÇOS. **Ferramenta VC 131 ou D6**.2024.Disponível em: <https://www.rodmancomercial.com.br/ferramenta-vc131-ou-d6>

REED-HILL, Robert E.; PATIÑO, Antônio Galán. **Princípios de metalurgia física**. Rio de Janeiro, Brazil: Guanabara Dois, 1982.

REVISTA CIÊNCIAS EXATAS. São Paulo, RCE,2018-. ISSN: 1516-2893

SANTOS, Hedipo Pereira dos. **Caracterização microestrutural dos aços 1020, 1045, 5160, 8620, após os determinados tipos de tratamentos térmicos de têmpera, revenimento, normalização e recozimento**. 2021. Trabalho De Conclusão De Curso – Centro De Tecnologia, Universidade Federal Do Ceará, Fortaleza,2021.

SANTOS, Luiz Fernando Araújo. **ESTUDO COMPARATIVO DE APLICABILIDADE ENTRE OS AÇOS AISI O1 (VND) E AISI D6 (VC 131) ATRAVÉS DE MEDIÇÃO DA DUREZA**. 2022.Trabalho De Conclusão de Curso-Curso de Engenharia Mecânica. Centro Universitário do Sul de Minas.Varginha,2022.

SERRAMETAL. **Aço D6 (VC131)**.2024. Disponível em: <https://serrametal.com.br/aco-d6/>. Acesso em 26 maio.2024.

SHLION METALS. **Aço Ferramenta D2**.2024 Disponível em: <https://www.shlionmetal.com/pt/products/mold-steel/d2-tool-steel/>. Acesso em: 28 de abril de 2024.

SILVA, Amanda de Oliveira. **Influência de diversos tratamentos térmicos na microestrutura e dureza do aço 1045**. 2021. Trabalho De Conclusão De Curso – Centro De Tecnologia, Universidade Federal Do Ceará, Fortaleza,2021.

SILVA, André Luiz da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e ligas especiais**. 2. ed. Sumaré,

SOARES, Pinto. **Aços: características, tratamentos**.2 ed. São Paulo: LTC.1992.

WALDEEN STEEL. **D2 Steel**. 2024. Disponível em: <https://waldunsteel.com/pt/produtos/d2-aco/>. Acesso em: 27 de abril de 2024.