

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

MATHEUS GASPAROTTO CANDIDO

**ESTUDO COMPARATIVO DA TEMPERABILIDADE ENTRE OS AÇOS
AISI: 1045, 4340, H13 E D6**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**LONDRINA
2021**

MATHEUS GASPAROTTO CANDIDO

**ESTUDO COMPARATIVO DA TEMPERABILIDADE ENTRE OS AÇOS
AISI: 1045, 4340, H13 E D6**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de TCC, do curso de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Odney Carlos Brondino

LONDRINA

2021



Apêndice 11 TERMO DE APROVAÇÃO

MATHEUS GASPAROTTO CANDIDO

ESTUDO COMPARATIVO DA TEMPERABILIDADE ENTRE OS AÇOS AISI: 1045, 4340, H13 E D6

Trabalho de conclusão de curso apresentado no dia 12 de Maio de 2021 como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Marcio Andreato Batista Mendes
(UTFPR – DAEMA)

Profª. Drª. Silvia Midori Higa
(UTFPR - DAEMA)

Prof. Dr. Odney Carlos Brondino
(UTFPR - DAEMA)

Profª. Drª. Silvia Midori Higa
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)
Coordenadora do Curso de Engenharia de Materiais

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais, José Carlos e Izabel e aos meus irmãos Murilo e Mathias, que sem eles, nada disso seria possível. O apoio da minha família em todos os momentos foi primordial para que chegasse a esse momento. Por eles, estou me tornando o primeiro engenheiro formado por uma universidade federal em minha família. Agradeço também, a minha avó, a Sra. Ezilda Vendramini, por ser uma mulher maravilhosa em minha vida e desde sempre ser minha segunda mãe.

Ao Prof. Dr. Odney Carlos Brondino, pela orientação deste trabalho e também pelo apoio incondicional em toda minha trajetória durante curso, sendo uma referência como profissional e também um amigo particular.

Aos meus amigos que estiveram junto a mim durante todos esses anos de faculdade, em especial a República Ladrento, a qual morei por 4 anos e passei os meus melhores momentos.

A UTFPR-Londrina, em especial a todos professores, pelos ensinamentos e aprendizados e pela formação como pessoa e profissional em todos esses anos.

Por fim, à minha namorada e companheira Jamille Fogaça, que enfrentou as mais diversas dificuldades comigo durante todo esse tempo e possui enorme participação na minha formação.

RESUMO

CANDIDO, Matheus G. **Estudo comparativo da temperabilidade entre os aços AISI: 1045, 4340, H13 e D6.** Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Materiais) – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2021.

Os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento são de extrema importância nas indústrias como ferramentas essenciais na obtenção de melhores propriedades mecânicas dos metais em suas respectivas aplicações. No entanto, as indústrias metalúrgicas possuem em suas atividades um dos maiores índices de emissões de carbono além de todo o dano que se faz inerente ao setor. Dessa forma se faz por necessário buscar soluções que mitiguem e compensem estas atividades poluidoras. O presente trabalho tem por objetivo propor um único processamento a todos os aços presentes no estudo, de maneira que se realize tais procedimentos de forma única, evitando assim repetição e reaquecimento do forno, o que conseqüentemente traz ganhos energéticos. Dessa maneira, o trabalho apresenta um comparativo de quatro dos aços mais empregados no ambiente comercial, submetendo estes aços às mesmas condições de tratamento térmico de têmpera e revenimento, no qual são avaliadas suas propriedades mecânicas através dos ensaios de dureza e de frequência de ressonância e também suas micrografias através das análises de microscopia óptica. Os resultados apontaram um melhor ganho efetivo de propriedade mecânica das ligas AISI H13 e AISI D6 quando comparadas as ligas AISI 1045 e AISI 4340. No entanto, os valores ainda apresentaram um pouco abaixo daqueles sugeridos pelos fabricantes.

Palavras-chave: Tratamento térmico. AISI 1045. AISI 4340. AISI D6. AISI H13.

ABSTRACT

CANDIDO, Matheus G. **Comparative study of the temperability among steel 1045, 4340, H13 and D6.** Course completion work – Academic Department of Materials Engineering, Federal University Technological of Paraná. Londrina, 2021

The tempering and tempering heat treatments are extremely important in the industries as essential tools in obtaining better mechanical properties of the metals in their respective applications. However, the metallurgical industries have in their activities one of the highest levels of carbon emissions in addition to all the damage that is inherent to the sector. Thus, it is necessary to seek solutions that mitigate and compensate for these polluting activities. The present work aims to propose a single processing to all the steels present in the study, so that such procedures are carried out in a unique way, thus avoiding repetition and reheating of the oven, which consequently brings energy gains. In this way, the work presents a comparison of four of the most used steels in the commercial environment, subjecting these steels to the same conditions of tempering and tempering heat treatment, in which their mechanical properties are evaluated through the hardness and resonance frequency tests and also your micrographs through optical microscopy analysis. The results showed a better effective gain in mechanical properties of the alloys AISI H13 and AISI D6 when compared to alloys AISI 1045 and AISI 4340. However, the values still showed a little below those suggested by the manufacturers.

Keywords: Heat Treatment. AISI 1045. AISI 4340. AISI D6. AISI H13.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama do ferro-carbono.	16
Figura 2 – Microestruturas originadas durante o resfriamento de ligas hipereutóides (direita) e hipoeutetóides (esquerda).....	17
Figura 3 – Procedimento tratamento térmico	18
Figura 4 – Diagrama TTT para um liga de ferro-carbono	19
Figura 5 – Superposição de curvas de resfriamento no TTT com diferentes tempos representados pelas letras A (resfriamento mais lento), B, C, D e E (resfriamento mais rápido).....	20
Figura 6 – Transformação austenita (CFC) para martensita (TCC).	22
Figura 7 – Microestrutura aço AISI 1045.....	23
Figura 8 – Temperatura de início de formação da martensita e sua morfologia em função do carbono.....	24
Figura 9 – Influência dos elementos de liga na curva TTT	25
Figura 10 – Tarugos dos aços selecionados com diâmetro de 25,4 mm	28
Figura 11 – Fluxograma da metodologia utilizada no trabalho	29
Figura 12 – Indentações na parte central e na borda da amostra com raio de 25,4 mm de um AISI 1045.....	31
Figura 13 – Equipamento Sonelastic ® utilizado para a aplicação do Ensaio de Ressonância.....	32
Figura 14 – Posicionamento das amostras dentro do forno	33
Figura 15 – Ciclos de tratamentos térmicos de Têmpera e Revenimento	34
Figura 16 – Metalografia AISI H13 como recebido ampliado 100x. As setas indicam possíveis inclusões na amostra.....	35
Figura 17– Metalografia do aço AISI H13 após tratamentos térmicos de têmpera e revenimento com uma ampliação de 100x. Setas indicam a formação de possíveis carbonetos.....	37
Figura 18 – Metalografia do aço AISI H13 após os tratamentos térmicos de têmpera e de revenimento com ampliação de 500x.....	39
Figura 19 – Metalografia AISI 1045 como recebido ampliado 100x	41
Figura 20 – Amostra “A7” do aço AISI 1045 ampliado 500x em dois momentos, como recebido e após os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento	42

Figura 21 – Amostra “A11” do aço AISI 4340 como recebido com ampliações de 100x (esquerda) e 500x (direita)	45
Figura 22 – AISI 4340 após os tratamentos térmicos de têmpera e de revenimento com duas ampliações distintas, sendo de 100x (esquerda) e 500x (direita). Ponto descrito pela letra A) indica uma possível presença de umidade durante a análise .	46
Figura 23 – Aço AISI D6 como recebido com ampliação de 500x.....	48
Figura 24 – AISI D6 após tratamentos térmicos de têmpera e de revenimento com ampliação de 500x	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química dos aços de estudo	15
Tabela 2 – Descrição das características das amostras preparadas	28
Tabela 3 – Ensaio de dureza (HRB) como recebido das amostras da liga AISI H13.	36
Tabela 4 – Ensaio de dureza (HRB) após os tratamentos térmicos das amostras da liga AISI H13	38
Tabela 5 – Módulos elásticos determinados através do ensaio de ressonância das amostras do aço AISI H13 em dois momentos, como recebido e após tratamentos térmicos (têmpera e revenimento).....	40
Tabela 6 – Ensaio de dureza (HRB) das amostras da liga AISI 1045 em dois diferentes momentos, como recebido (A) e também após os procedimentos de têmpera e revenimento (B).....	42
Tabela 7 – Módulos elásticos determinados através do ensaio de ressonância das amostras do aço AISI 1045 em dois momentos, como recebido e posterior aos tratamentos térmicos de têmpera e de revenimento do material.....	44
Tabela 8 – Ensaio de dureza (HRB) das amostras da liga AISI 4340 como recebido	44
Tabela 9 – Ensaio de dureza (HRB) após dos tratamentos térmicos das amostras da liga AISI 4340.....	45
Tabela 10 – Módulos elásticos determinados através do ensaio de ressonância das amostras do aço AISI 4340 em dois momentos, como recebido e posterior aos tratamentos térmicos de têmpera e de revenimento do material.....	47
Tabela 11 – Ensaio de dureza (HRB) como recebido (A) a após os tratamentos térmicos das amostras da liga AISI D6 (B).....	50
Tabela 12 – Módulos elásticos determinados através do ensaio de ressonância das amostras do aço AISI D6 em dois momentos, como recebido e posterior aos tratamentos térmicos de têmpera e de revenimento	51

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
γ	Austenita
Cr_7C_3	Carboneto de Cromo
ε	Carboneto Épsilon
Me_7C_3	Carboneto Metálico
C	Carbono
Fe_3C	Cementita
Cr	Cromo
CCC	Cúbica de Corpo Centrado
CFC	Cúbica de Face Centrada
α	Ferrita
Fe	Ferro
®	Marca registrada
mm	Milímetro
$\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$	Perlita
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
TCC	Tetragonal de Corpo Centrado
TTT	Transformação-Temperatura-Tempo
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVO	11
2.1 OBJETIVO GERAL.....	11
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3 JUSTIFICATIVA	12
4 REFERENCIAL TEÓRICO	13
4.1 AÇOS	13
4.1.1 História do Aço no Cenário Brasileiro	13
4.1.2 Composição do Aço.....	13
4.1.3 Diagrama Ferro-Carbono.....	15
4.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS.....	17
4.2.1 Gráfico TTT	19
4.3 TÊMPERA	21
4.3.1 Fatores que Modificam a Temperabilidade dos Materiais	24
4.4 REVENIMENTO	26
5 MATERIAIS E MÉTODOS	28
5.1 MATERIAIS	28
5.2 MÉTODOS	28
5.2.1 Preparação das amostras.....	30
5.2.2 Microscopia Óptica	30
5.2.3 Ensaio de Dureza	30
5.2.4 Ensaio de Ressonância	32
5.2.5 Tratamento Térmico	33
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
6.1 AISI H13	35
6.2 AISI 1045	40
6.3 AISI 4340	44
6.4 AISI D6	48
7 CONCLUSÃO	52
8 SUGESTÕES PARA OS PRÓXIMOS TRABALHOS	53
REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

Com o intenso desenvolvimento tecnológico e a competitividade das indústrias em busca de conseguir correlacionar custo e qualidade do produto, o desenvolvimento e estudo de materiais torna-se necessário para que seja possível atender essa demanda. A utilização dos aços em diversos segmentos industriais faz com que seja necessário buscar por inovações que alterem uma ou outra propriedade específica para uma aplicação como uma maior resistência mecânica, por exemplo. Os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento visam elevar as propriedades mecânicas dos aços, dependendo da aplicação da peça.

Diante de tais pontos apresentados os aços designados pela AISI (*American Iron and Steel Institute*), como 1045, 4340, D6 e H13 são muito aplicados nos mais diversos setores da indústria. Tais aplicações variam desde eixos de ventiladores e de bombas das torres de destilação, como do petróleo com o aço AISI 1045, até para matrizes fabricadas em aço H13, utilizadas no processo de forjamento de bielas e virabrequins de aplicação automotiva. Estas matrizes suportam elevadas temperaturas de trabalho, e que permitem essa aplicação combinada com uma boa resistência ao desgaste.

Uma das características mais importantes que tornam os materiais metálicos ainda mais interessantes é sua versatilidade e a possibilidade de alterações em sua propriedade mecânica.

No entanto o setor metalúrgico apresenta uma grande capacidade de causar impactos e riscos ao meio ambiente, sendo em alguns casos irreversíveis. Dessa maneira, o setor tem por obrigação procurar meios que mitiguem tais riscos através das mais diferentes formas, seja ela por inovações em seus processos ou até mesmo meios de tratamento da geração de seus resíduos. O presente estudo visa avaliar os ganhos nas propriedades mecânicas que serão obtidos pelos materiais aqui presentes quando esses forem realizados sobre as mesmas condições de tratamentos térmicos em uma única batelada, evitando a reutilização do forno e desperdício de energia.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem por objetivo geral analisar quais serão as repostas mecânicas dos materiais presentes no trabalho quando esses forem submetidos a tratamentos térmicos de têmpera e revenimento sob as mesmas condições de temperatura de austenização, meios de têmpera e de temperatura de revenimento.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A partir do objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Determinar as durezas dos materiais presentes no trabalho em dois momentos distintos, como recebido e após a realização dos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento;
- Determinar do módulo elástico dos materiais nos dois momentos, como recebido a após os tratamentos térmicos realizados;
- Analisar as microestruturas destes materiais através da microscopia óptica;
- Discutir os resultados apresentados dos aços AISI 1045, AISI D6, AISI 4340 e AISI H13.

3 JUSTIFICATIVA

Diariamente as indústrias metalúrgicas são responsáveis por emitir e lançar uma grande quantidade de gás carbônico na atmosfera. Além disso, as atividades geram diversos outros tipos de resíduos que afetam a sustentabilidade destas atividades. Com isso, as indústrias do ramo metalúrgico precisam se adaptar melhor às boas práticas de ESG (*Environmental, Social and Governance*), buscando melhores soluções e práticas de forma a gerar valor na sociedade em geral. Buscar formas de se otimizar o processo são maneiras de mitigar os riscos e entregar à sociedade melhores resultados (PEREIRA, 2020).

Diante disso, os quatro aços selecionados para o trabalho representam boa parte dos ferramentais fabricados e tratados termicamente para serem empregados na conformação de outros materiais. Dessa forma, realizar uma comparação microestrutural e mecânica com os parâmetros pré-definidos com o objetivo de unificar o processo de tratamento térmico em uma única batelada, o que permite uma redução de consumo de energético, será de grande valia para os profissionais da área.

Embora haja informações a respeito das propriedades destes materiais mais empregados na indústria metalúrgica, trabalhos que reúnem estes aços não são encontrados com facilidade em revistas e periódicos, sendo, desta forma, de grande importância um trabalho que relate a execução destes tratamentos e ensaios que tenham uma relação entre a morfologia das estruturas obtidas com as técnicas propostas neste trabalho.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 AÇOS

4.1.1 História do Aço no Cenário Brasileiro

A relação da história do aço com o Brasil se inicia com a chegada da família real portuguesa em solo brasileiro, a qual sob ameaças de invasão do território português por Napoleão Bonaparte, foge para o Brasil. Com a chegada das majestades, inicia-se então um processo intenso de civilização nas ruas do Rio de Janeiro, como alargamentos de ruas, construção de habitações, construções de novos espaços urbanos entre outras inúmeras obras que passam a ocorrer para atender um acréscimo de 20% de uma só vez da população carioca (NEVES; CAMISASCA, 2013).

Os primeiros relatos de produção de ferro na colônia se dão por volta de 1532, quando Martim Afonso de Sousa, um nobre militar português, funda a primeira vila do país em São Vicente. Os livros relatam que Martim traz ao Brasil o mestre Bartolomeu Fernandes, um ferreiro contratado por Portugal que visava atender todas as necessidades que o Brasil necessitava naquele momento, como facões, enxadas, machados, anzóis entre outros materiais que eram necessários para os trabalhos rurais executados na época (NEVES; CAMISASCA, 2013).

Diante de tal cenário, com passar dos anos, o bandeirante Afonso Sardinha dá início à industrialização do ferro no Brasil, quando, ele e seu filho, encontram minério de ferro na ocasião onde estavam em suas buscas por ouro. Sardinha então, especialista em fusão de metais, trabalhou na redução do minério, dando início ao surgimento de uma pequena forja localizada no interior de São Paulo, que se tornou a primeira indústria de siderúrgica reconhecida no Brasil (NEVES; CAMISASCA, 2013).

4.1.2 Composição do Aço

O aço tem em sua composição básica dois elementos fundamentais, Fe e C além do Mn, Si, P e S, estes por sua vez, são inerentes ao processo de obtenção do aço. Além destes elementos, podem ser adicionados outros elementos em sua

composição, caracterizando novas ligas ferrosas. Tais elementos são encontrados com certa facilidade na crosta terrestre, justificando até o seu alto grau de utilização além de suas propriedades. O ferro é encontrado fortemente associado ao oxigênio e à sílica, no qual o minério de ferro é um óxido de ferro misturado com uma areia bem fina. Já o carbono pode ter sua origem em diversas formas, porém na siderurgia, tem como fonte principal o carvão mineral ou até mesmo carvão vegetal (FELÍCIO, 2012; INSTITUTO AÇO BRASIL, 2015).

Para se ter economia e também um maior rendimento do processo, o minério e o carvão são modificados antes de iniciar o processo de redução do minério, sendo transformados em pelotas e destilados respectivamente, processo conhecido nas siderúrgicas por pelotização. Com o carvão mineral obtém-se o coque, que, com o oxigênio e outros gases, são os responsáveis pela elevação da temperatura em altos-fornos. (FELÍCIO, 2012; INSTITUTO AÇO BRASIL, 2015).

O carvão na siderurgia possui uma dupla função, sendo elas combustível, permitindo o aquecimento para que se ocorra o processo de fusão deste minério, e conseqüente também atua como um redutor, ligando-se ao oxigênio presente no minério do ferro em presença de elevadas temperaturas, permitindo que o ferro fique livre. Todo o processo descrito ocorre no interior de alto fornos em siderúrgicas (FELÍCIO, 2012; INSTITUTO AÇO BRASIL, 2015).

Com a preparação da carga realizada previamente, tem-se início então a etapa de redução do ferro. Nesta etapa, o ferro se liquefaz devido a presença de altas temperaturas empregadas, sendo batizado de ferro gusa ou ferro de primeira fusão. Formam-se então as impurezas que são os calcários, sílicas e outros elementos que estão na composição desse material, chamados de escórias, que servem para reduzir a contaminação de partículas inorgânicas não desejadas, além de muitas vezes ser útil para a produção de cimentos, por exemplo (FELÍCIO, 2012).

Finalizada a etapa de redução, tem-se início então a etapa de refino do aço. Ainda no estado líquido, o aço é introduzido em fornos de oxigênio ou elétricos, aonde para ser transformado em aço, realiza-se então a queima de impurezas presentes assim como se realiza as adições que se julgar necessária de outros elementos químicos (FELÍCIO, 2012).

Realizados os processos descritos acima, o aço então passa pelo lingotamento, que pode ser contínuo ou em lingoteiras, onde o aço é resfriado e sofre uma transformação de estado físico, sendo transformado agora em um sólido. A partir

de seu estado sólido, o aço agora passa pelo processo de laminação nos quais são transformados de acordo com a aplicação, podendo ser tarugos, blocos, lâminas, entre outros (FELÍCIO, 2012).

Após todo procedimento, os aços têm suas características definidas pelas suas composições químicas, onde tal classificação de sua composição é estabelecida por normas da *American Society for Testing and Materials* – ASTM e da *Society of Automotive Engineers* – SAE, os quais através de suas letras e números, designam a uma determinada classe e conseqüentemente ao seu teor de carbono em sua composição química. No Brasil, os dados e critérios adotados como o *American Iron and Steel Institute* – AISI, também são aceitos (CHIAVERINI, 2003). Deste modo, os aços de objetos de estudo estão descritos conforme suas composições químicas pela tabela 1.

Tabela 1 – Composição química dos aços de estudo

	AISI			
	1045	4340	D6	H13
Carbono	0,43 - 0,50%	0,38 - 0,43%	2 - 2,25%	0,32 - 0,45%
Manganês	0,60 - 0,90%	0,60 - 0,80%	0,20 - 0,6%	0,20 - 0,60%
Fósforo Máx.	0,03%	0,03%	0,03%	0,03%
Enxofre Máx.	0,05%	0,04%	0,03%	0,03%
Silício	-	0,15 - 0,35%	0,20 - 0,40%	0,80 - 1,25%
Níquel	-	1,65 - 2,00%	-	-
Cromo	-	0,70 - 0,90%	11 - 13%	4,75 - 5,50%
Molibdênio	-	0,20 - 0,30%	-	1,10 - 1,75%
Vanádio	-	-	0,15 - 0,30%	0,80 - 1,20%
Tungstênio	-	-	0,80 - 1,25%	-

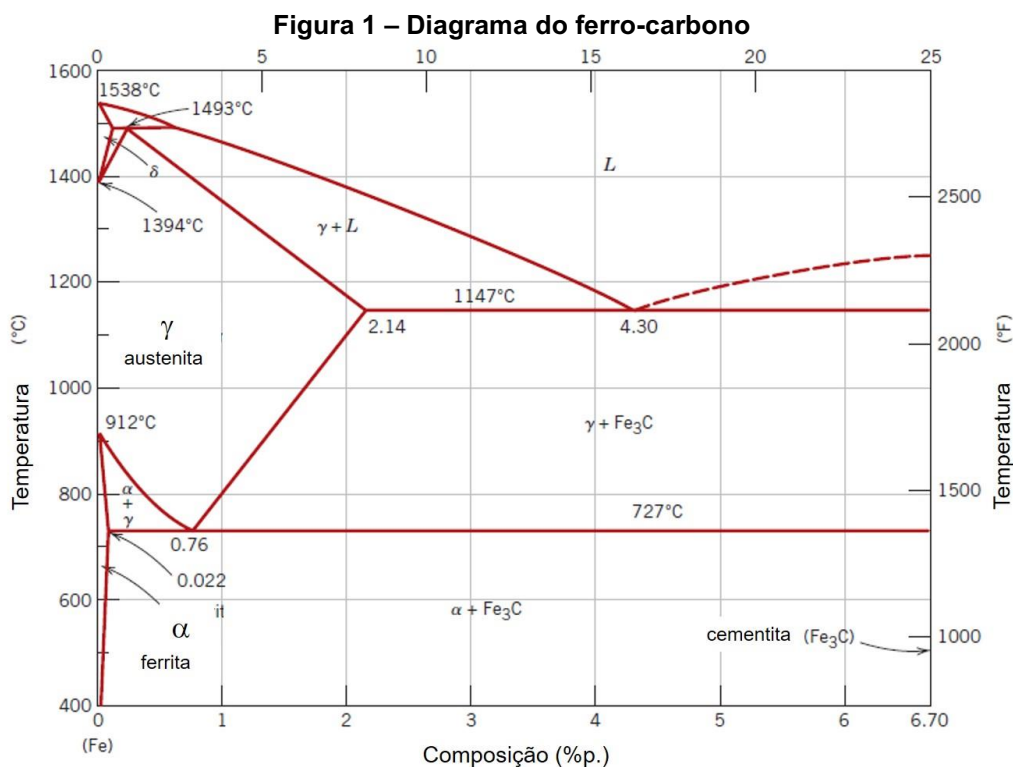
Fonte: Dados catálogos GERDAU.

4.1.3 Diagrama Ferro-Carbono

O aço é uma combinação de vários de elementos, sendo dentre deles os mais importantes o carbono e o ferro. A sua variação do C, como demonstrada na figura 1, pode ser entre 0,022%p até 2,14%p. O carbono, em geral, atua como um interstício na solução, já que o carbono possui um raio atômico maior que a do ferro, o que faz com que, em diferentes proporções dentro da sua estrutura, gere diferentes e importantes fases que determinarão as propriedades mecânicas para o material (CALLISTER,2008).

Na temperatura ambiente, é possível observar que as estruturas da liga ferro carbono seriam um misto de ferrita e cementita. Porém, na produção industrial, ocorrem resfriamentos de alta velocidade que não permitem que esse equilíbrio metaestável seja atingido e é comum a formação de outras fases (CALLISTER,2008).

As fases presentes no diagrama são a ferrita (α), uma solução sólida de carbono em ferro (CCC), austenita (γ), uma solução sólida do carbono em ferro (CFC), ferrita (α), do qual, para teores pequenos de carbono acima de 1394°C, o ferro se altera novamente para (CCC), sendo uma fase de solução sólida de carbono em ferro (CCC), cementita (Fe_3C), um carboneto de ferro extremamente duro e perlita ($\alpha+\text{Fe}_3\text{C}$), sendo uma mistura de ferrita com cementita (CHIAVERINI, 2003).

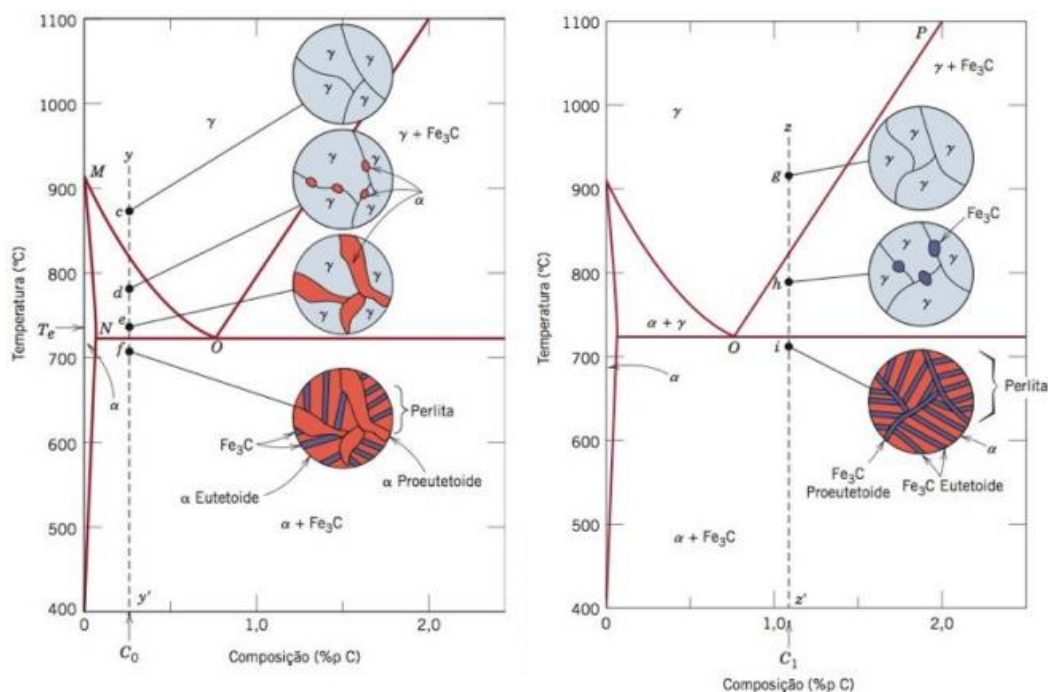


Fonte: Adaptado de Callister (2008).

Na figura 2, é observado o ponto eutetóide representado pelo ponto O, na temperatura de 727°C. Nesta faixa de composição em 0,76 %p de carbono, na mesma figura é possível observar que ao cruzar o ponto eutetóide, o material tem sua estrutura transformada de perlita e ferrita para austenita. Aços, como o AISI 1045, AISI 4340 e AISI H13, estudados nesse trabalho, são considerados aços hipoeutetóides por possuírem, em sua composição, porcentagens de carbono menores que 0,7%p

na liga, enquanto o AISI D6 é uma liga hipereutetóide, por possuir em sua composição uma %p de carbono maior que o 0,7%p, assim como demonstrado na tabela 1.

Figura 2 – Microestruturas originadas durante o resfriamento de ligas hipereutóides (direita) e hipoeutóides (esquerda).



Fonte: Adaptado de Callister (2008).

4.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS

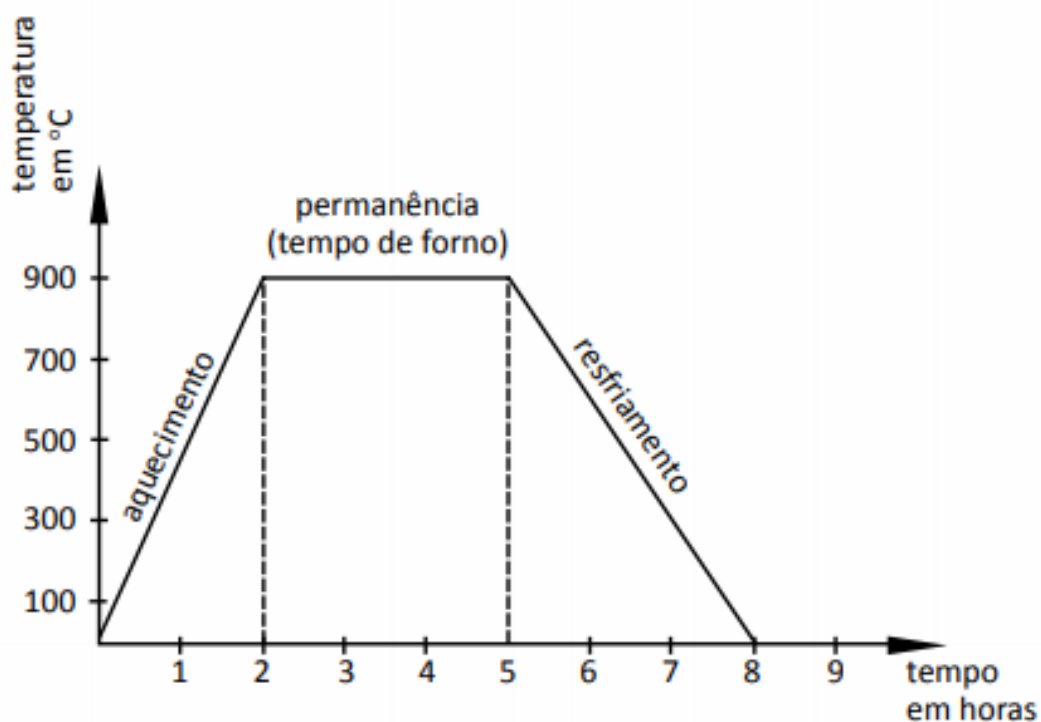
Os tratamentos térmicos são procedimentos comuns realizados em materiais metálicos com o objetivo de alterar as propriedades e estruturas de um determinado material através da ação do calor (NOVIKOV, 1994).

O tratamento térmico pode ser definido como um procedimento muito utilizado no processamento de metais onde se tem um aquecimento e resfriamento controlados a fim de alterar as propriedades de sua peça em função da sua aplicação, podendo elevar a dureza, bem como proporcionar uma tenacidade adequada a uma aplicação específica (CARVALHO, 2004).

A técnica consiste em fazer um aquecimento em uma taxa controlada, no qual após atingir a temperatura de austenitização necessária - por um tempo de encharque que vai depender de sua espessura -, o material será resfriado controladamente de acordo com a escolha do tratamento térmico que será realizado,

que poderão afetar as propriedades mecânicas destes materiais. A figura 3 ilustra o procedimento de um tratamento térmico hipotético.

Figura 3 – Procedimento tratamento térmico



Fonte: Aços Gerdau (2019).

Como citado acima, existem diversos tratamentos térmicos com diferentes objetivos, podendo ser para a melhoria de sua usinabilidade, conformabilidade, ou ainda, restaurar ductilidade após um processamento a frio dos metais. No caso da têmpera e revenimento o objetivo é o de aumentar sua dureza, porém com tenacidades adequadas em função da aplicação final.

No caso de molas de carro, por exemplo, a necessidade de aplicação se dá pelo fato de o material ter a função de se deformar elasticamente sem que perca sua forma. Ao passar sobre uma lombada, por exemplo, a mola acumula toda a energia amortecendo o movimento da roda do carro. Em seguida, ela se estende novamente devolvendo tal energia, e o pneu voltando à sua posição original. Para conseguir suportar essa solicitação, a mola exige certa tenacidade, assim como dureza e resistência mecânica para resistir a essas solicitações sem que sofra uma deformação permanente (AÇOS GERDAU, 2019).

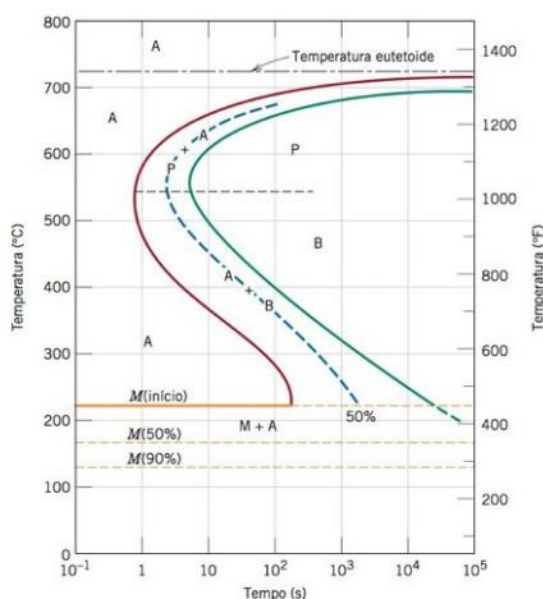
Os tratamentos térmicos mais comuns utilizados na indústria são a têmpera, revenimento, recozimento, normalização, esferoidização, austêmpera e martêmpera.

As alterações de propriedades que ocorrem nos materiais metálicos são devidas às mudanças estruturais que ocorrem no aço, sujeitos a ação do calor, não havendo mudança de composição química do mesmo. Essas modificações poderão ser benéficas ou não ao material, de forma a aumentar ou diminuir tal propriedade. No entanto, tal modificação será intrínseca ao material, ou seja, não desaparecerá após a retirada do calor (CARVALHO, 2004). Há diversas situações em que o tratamento térmico não é desejável, porém ocorrem, como no caso de uma solda, por exemplo, no qual um aquecimento elevado pode levar a zona afetada termicamente - ZAT a uma têmpera indesejada e causar uma fragilização no aço, comprometendo a estrutura e a tenacidade do aço (AÇOS GERDAU, 2019).

4.2.1 Gráfico TTT

O diagrama representado na figura 4, conhecido como Transformação-Temperatura-Tempo (TTT), indica qual será a estrutura resultante final do seu material após o resfriamento em função do tempo. É importante ressaltar que diagrama é válido apenas para o controle do resfriamento do material. As linhas M_i e M_f , representam, respectivamente, o início da transformação em martensita e o final de tal transformação. Normalmente, os resfriamentos térmicos são contínuos, porém existem os isotérmicos também (CHIAVERINI, 2003).

Figura 4 - Diagrama TTT para um liga de ferro-carbono



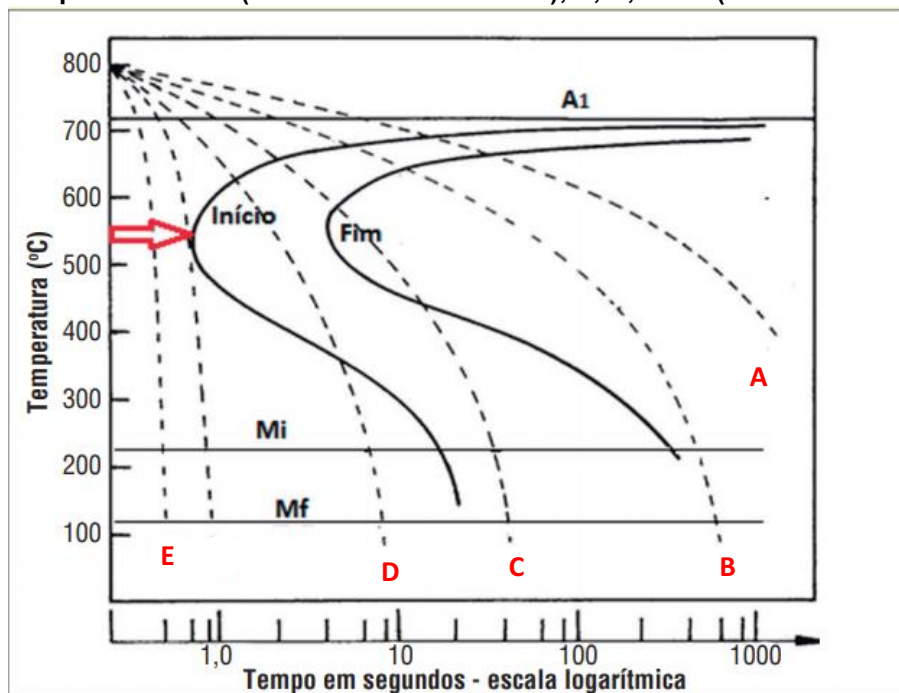
Fonte: Callister (2008).

Além das fases descritas presentes no diagrama ferro-carbono, é possível obter, através de um resfriamento mais rápido no material, fases como a martensita e a bainita (fases metaestáveis), em que o processo de transformação da austenita em outros materiais pode se dar através de um processo de difusão mais lento, que busca o equilíbrio termodinâmico no material, assim como o processo de cisalhamento, que deforma a rede cristalino do material, sendo realizado de forma instantânea (SILVA E MEI, 2006).

A martensita é um produto dessa rápida transformação da austenita. Com o resfriamento sendo realizado de modo quase que instantâneo ao tratamento térmico de têmpera realizado, o carbono não possui tempo suficiente para se difundir na microestrutura e acaba por permanecer dentro da estrutura, causando uma distorção na rede do material, que resulta no aparecimento da estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC), ocasionando um aumento expressivo de resistência mecânica ao material (CALLISTER, 2008).

A partir da figura 5 é possível determinar, após o aquecimento de austenitização e um posterior resfriamento para um aço hipotético, qual será sua estrutura resultante como consequência de diferentes taxas de resfriamento.

Figura 5 – Superposição de curvas de resfriamento no TTT com diferentes tempos representados pelas letras A (resfriamento mais lento), B, C, D e E (resfriamento mais rápido)



Fonte: Adaptado de Vendramim (2014).

Todos esses resfriamentos, com exceção da bainita, são realizados em resfriamentos contínuos, onde temos em E, a estrutura Martensita. Já a partir de A, B e C, temos perlita, onde A é mais grosseira do que B, e B mais grosseira do que C em função do tempo de difusão durante o resfriamento, sendo mais grosseiro para o resfriamento mais lento. Para a realização da isoterma, normalmente realizada entre 500°C e 250°C (figura 3), é traçada uma linha contínua e paralela ao eixo da abcissa, e a estrutura resultante poderá ser bainita superior ou inferior, dependendo da faixa de temperatura em que se está trabalhando (CHIAVERINI, 2003).

4.3 TÊMPERA

O termo “martensita revenida” corriqueiramente está relacionado a uma das melhores combinações em termos de propriedades mecânicas para aços: a combinação de tenacidade e dureza. Contudo, tal microestrutura com esse arranjo não é fornecido na forma bruta comercialmente, sendo necessário realizar tratamentos para sua obtenção (ZUPPO, 2011).

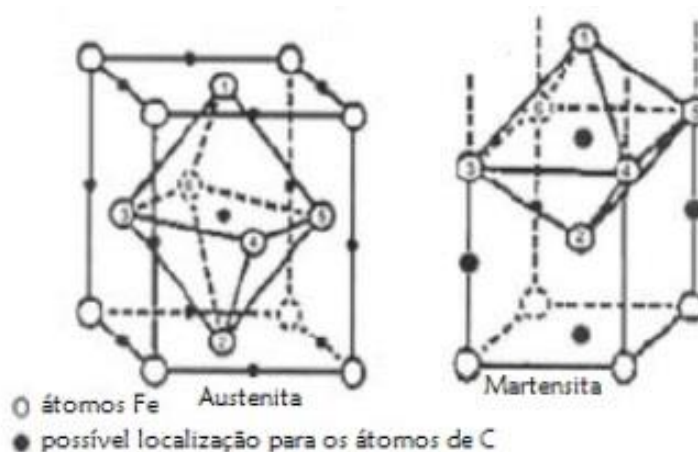
A têmpera é o tratamento térmico considerado de maior importância dentre os tratamentos térmicos, visto que a partir deste tratamento acompanhado do revenimento, possibilitam o emprego de peças de maior responsabilidade em aplicações mais críticas dentro de uma indústria de transporte, mecânica entre outras (CHIAVERINI, 2003).

O processo consiste em aquecer o material ou peça acima da linha crítica e, em seguida, resfriá-lo bruscamente em óleo, água ou em outros meios químicos de resfriamento como a salmoura, por exemplo, onde dependendo dessa capacidade de resfriamento, brusco ou mais lento, proporcionará resultados diferentes, como martensitas mais agulhadas, em meios de maior severidade (AÇOS GERDAU, 2019). O procedimento é realizado a partir de um resfriamento brusco para evitar que ocorra uma transformação de fase perlítica ou a formação de bainita, o que faria perder sua estrutura metaestável martensita e conseqüente suas propriedades (ZUPPO, 2011).

A têmpera proporciona ao material uma elevada dureza, visto que sua estrutura é toda deformada, transformando de CFC para TCC, como mostra a figura 6. O carbono presente em sua estrutura não consegue difundir devido ao resfriamento brusco que é aplicado, causando uma grande distorção em sua estrutura, o que pode

ocasionar inclusive trincas do material. Devido a tal fato, o aço fica com um nível de tensionamento interno altíssimo (SILVA, 2016).

Figura 6 – Transformação austenita (CFC) para martensita (TCC).



Fonte: Adaptado de VALES (2010, p. 30).

A representação na figura 5 dos procedimentos têmpera pode ser representada pela letra E, com um resfriamento brusco.

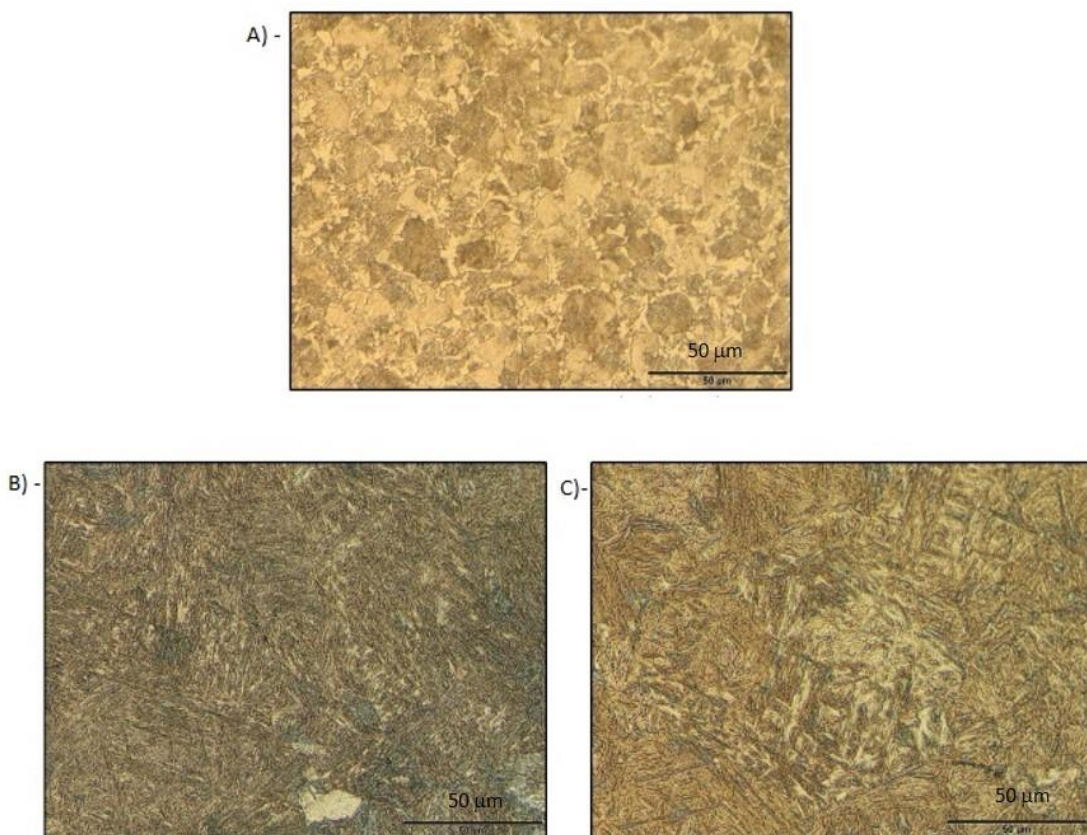
Quanto mais a curva do diagrama TTT for deslocado para a direita, maior a probabilidade de se resultar uma estrutura completamente martensítica, já que a curva de resfriamento terá mais tempo para realizar sua mudança de fase sem que tangencie ou passe por dentro das regiões de transformação perlítica ou bainita (ZUPPO, 2011).

O tratamento de têmpera traz além de uma dureza elevada, bem como, uma alta resistência mecânica e, por consequência, fragilidade. A tendência em uma peça é o aumento da dureza em razão da martensita com o aumento do teor de carbono no material, devido ao fenômeno, já mencionado acima, sobre o carbono e sua difusividade na estrutura ao se realizar o resfriamento brusco na estrutura e todas as tensões criadas. Essas tensões devem ser eliminadas ou diminuídas da têmpera para que possa se obter o um equilíbrio necessário para a estrutura, onde se realiza o procedimento, que será citado posteriormente nesse trabalho, de revenimento (CHIAVERINI, 2003).

Se observarmos a figura 7, é possível notar as diferentes microestruturas de um aço AISI 1045 diante de diferentes meios de resfriamento no material e seu estado

normalizado. Na figura 7a, temos a estrutura de um aço 1045 normalizado, com lamelas de perlita, ainda que não seja intencional devido a processos anteriores de conformação da barra trefilada. Já na figura 7b, é possível verificar uma intensa presença de agulhas de martensita, oriundas de um resfriamento severo causado pela salmoura. E na figura 7c, foi observado uma microestrutura de um aço temperado em água, com algumas agulhas martensíticas dispersas em uma matriz ferrítica (SILVA JUNIOR, 2016).

Figura 7: Microestrutura aço AISI 1045

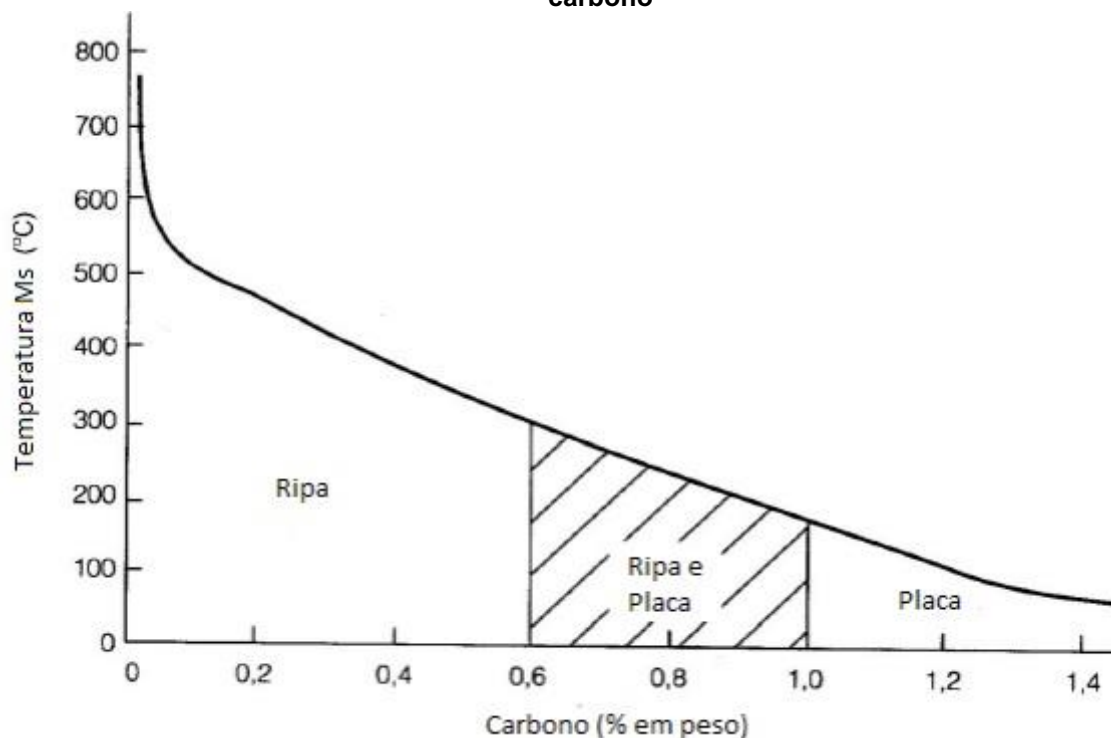


Fonte: Adaptado de Silva Junior *et al.* (2016 p.5).

No oposto do que é encontrado nos processos de transformação de fases por difusão, as transformações martensíticas não dependem do tempo, mas sim da temperatura (VALES,2010). Desse modo, o M_i é definido como a temperatura a qual se inicia o processo de transformação martensítica e M_f é o momento em que ela é finalizada. Observa-se através da figura 8, à medida que vai ocorrendo uma variação de teor de carbono, ocorre simultaneamente uma diferença de morfologia, sendo

placas ou agulhas para aços com teores maiores que 1% e ripas para aços com teores menores que 0,6%.

Figura 8 – Temperatura de início de formação da martensita e sua morfologia em função do carbono



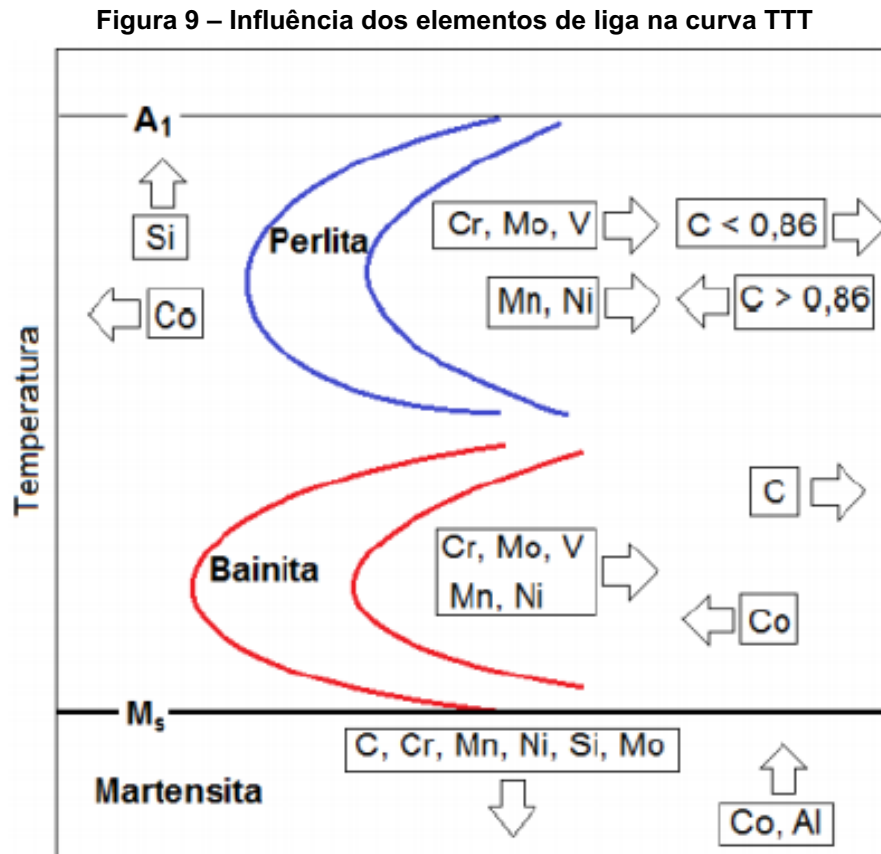
Fonte: VALES (2010, p. 33).

4.3.1 Fatores que Modificam a Temperabilidade dos Materiais

Vale ressaltar que um material que apresente alta índice de temperabilidade é aquele que, mesmo que seu resfriamento não seja realizado de forma brusca, ou seja, de maneira rápida, consegue realizar a sua transformação de fase martensítica sem que forme fases de cementita e de ferrita. Dessa maneira, os aços têm sua temperabilidade influenciada por fatores como tamanho de grão austenítico, composição química e homogeneidade da microestrutura austenítica inicial (COLPAERT, 2008).

Dependendo da liga, alguns elementos de liga podem ser adicionados ao material no intuito de gerar uma melhor temperabilidade ao aço, como demonstrado na figura 9. A inclusão de elementos como cromo, por exemplo, pode dar ao aço uma maior temperabilidade, ou seja, mover a linha de transformação da perlita para a direita, ocasionado em um maior tempo para que a estrutura se converta em martensita, por exemplo. Esses elementos de liga retardam a transformação difusional

da austenita, o que conseqüentemente retarda o aparecimento de perlita e de ferrita (CALLISTER, 2008). Os aços aqui estudados no presente trabalho, à exceção do AISI 1045, possuem em sua composição uma grande quantidade de elementos de liga representados pela figura 9.



Fonte: Soares (1987).

Além dos elementos de liga, há também um acréscimo na temperatura e no tempo no momento da austenização do material. Os grãos de austenita surgem através da nucleação e crescimento de forma heterogênea nas interfaces cementita-ferrita, gerando grãos em escala pequena. No entanto, com o aquecimento deste a temperaturas ainda mais elevadas, as difusões atômicas são mais rápidas, o que torna possível o surgimento de grãos ainda maiores (REED-HILL *et al.* 2009). Com uma menor área de unidade/volume de contornos de grãos, se torna ainda mais difícil a nucleação de perlitas e ferrita, o que pode aumentar a temperabilidade desse material. No entanto, vale ressaltar que os tamanhos de grãos exagerados podem causar efeitos nocivos ao material, como, por exemplo, uma queda expressiva de ductibilidade.

4.4 REVENIMENTO

Como citado ao longo do trabalho sobre toda tensão que é criada, assim como também sua conseqüente fragilidade na estrutura após o tratamento térmico de têmpera, faz-se necessário um tratamento de revenimento no material a fim de recuperar um pouco de sua tenacidade, aliviando um pouco dessas tensões sem que ocorra um comprometimento da dureza do metal (RUCHERT, 2019).

Este tratamento consiste em aquecer a peça ou material até a temperatura abaixo de sua linha crítica, para que não ocorra sua austenização (CHIAVERINI, 2003). Durante o revenimento, o material perde o excesso de carbono em solução, enquanto seu reticulado vai se tornando mais próximo da ferrita, a qual não se tem distorção e nem acúmulo de tensões. Quanto maior for à temperatura no material se aproximando da linha crítica, maior será o efeito de revenimento em sua estrutura e mais tenaz será o material temperado (AÇOS GERDAU, 2019). O processo envolve a segregação do carbono em defeitos do reticulado, precipitação de carbonetos, entre outros, obtendo assim através da difusão do carbono uma estrutura mais estável, e conseqüentemente mais dúctil (CALLISTER, 2008).

Entre 100 e 200°C não há mudanças significativas em sua dureza, porém há nessa faixa a precipitação de carbonetos épsilon (ϵ), já que as martensitas de alto carbono se precipitam em carbonetos e em martensita de baixo carbono, principalmente em aços com carbono superiores a 0,2%p. A partir de 200 até 260°C, é possível notar no material uma menor dureza, sem que haja nenhuma mudança significativa em sua estrutura, com o surgimento de alguns carbonetos (ϵ) e também com a provável presença de bainita, já que a austenita retida pode se transformar nessa estrutura. Já em uma faixa de temperatura entre 260 e 360°C os valores de dureza de um material começam a cair, podendo ocorrer a dissolução de carbonetos (ϵ) na estrutura e perda de carbono, perdendo a tetragonalidade e transformando-se em ferro cúbico (CHIAVERINI, 2003; REED-HILL et al. 2009).

Logo em seguida, acima dessa temperatura, inicia-se então um processo de transformações estruturais e mecânicas, ocorrendo o processo de recuperação e recristalização desses metais, com eliminação das discordâncias, crescimento dos grãos e até certa esferoidização das partículas de cementita, que contribui diretamente para o aumento da tenacidade da peça (AÇOS GERDAU, 2019).

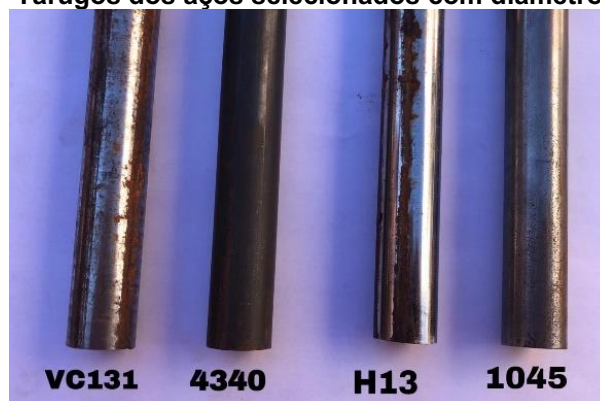
O último estágio ocorre em aços que possuem elementos de liga. Os elementos presentes como cromo, manganês, molibdênio, entre outros, podem ser encontrados tanto na ferrita quanto nos carbonetos já que em faixas de temperaturas mais elevadas, esses se dissolvem na estrutura. Considerando que a energia para difundir átomos substitucionais é maior ao comparar com os intersticiais, em faixas de temperaturas por cerca de 500°C, os carbonetos tendem a formar carbonetos do tipo M_3C , sendo o M um elemento substitucional, porém com temperaturas acima dessa faixa podem ocorrer a precipitação de carbonetos de liga que não aderem à esta fórmula, dando assim um novo endurecimento ao material (REED-HILL et al. 2009).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 MATERIAIS

Os materiais estudados deste trabalho foram adquiridos na distribuidora de aços Sulferração, situada na cidade de Londrina – PR. Todos os aços possuem certificados de qualidade, sendo os metais VC131 (equivalente ao AISI D6) e o AISI H13 da empresa Villares Metals, e os aços AISI 4340 e AISI 1045 da empresa Gerdau. Todos os aços, com suas respectivas composições presentes nos certificados de qualidade, estão em linha com as composições descritas pela tabela 1.

Figura 10 – Tarugos dos aços selecionados com diâmetro de 25,4 mm



Fonte: autoria própria.

5.2 MÉTODOS

Junto à distribuidora de aços, foram obtidos tarugos de 500 mm de comprimento e Ø 25,4 mm, sendo um tarugo para cada tipo de material. Os tarugos foram cortados em uma policorte situada nos laboratórios do Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais da UTFPR, campus de Londrina.

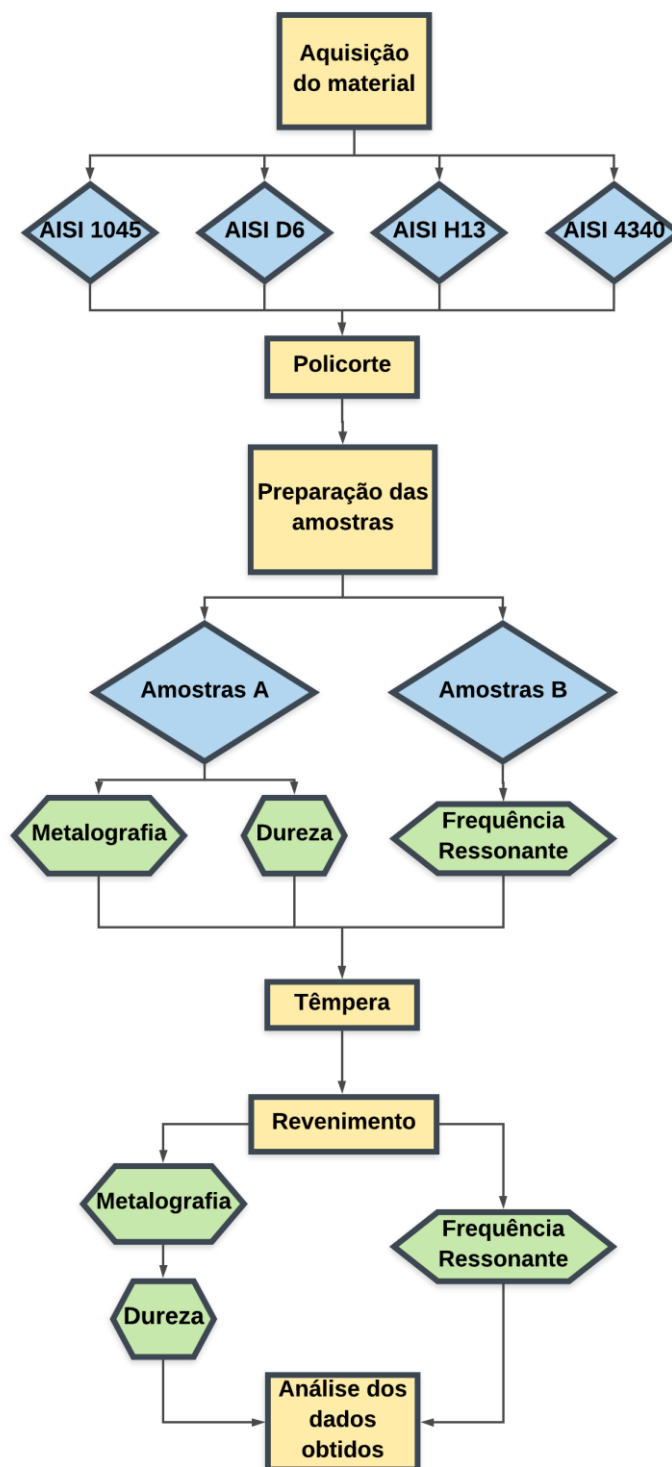
Tabela 2 – Descrição das características das amostras preparadas

AMOSTRAS A			AMOSTRAS B		
Material	Quantidade	Comprimento (mm)	Material	Quantidade	Comprimento (mm)
AISI H13	3	15	AISI H13	3	75
AISI 1045	3	15	AISI 1045	3	75
AISI 4340	3	15	AISI 4340	3	75
AISI D6	3	15	AISI D6	3	75
Total	12		Total	12	

Fonte: autoria própria.

O procedimento metodológico desenvolvido neste trabalho está melhor descrito no fluxograma apresentado na figura 11.

Figura 11 - Fluxograma da metodologia utilizada no trabalho



Fonte: Autoria própria

5.2.1 Preparação das Amostras

As amostras classificadas como “A” foram lixadas com lixas d’água, com a ajuda de uma lixadeira e politriz da marca Fortel, modelo PLF. As amostras que foram usadas para as análises metalográficas e ensaios de dureza foram inicialmente lixadas por lixas com grãos G80 para retirada de alguns óxidos e algumas marcas de cortes decorrentes dos discos de corte. Em seguida, as amostras passaram pelas lixas com grãos: G220, G400, G600 e G1200, para um melhor acabamento superficial. Após o processo, as amostras foram polidas com alumina em suspensão de 0,3 μm na politriz, para uma posterior análise por microscopia óptica (MO) e dureza Rockwell na escala B (HRB).

No entanto, antes da realização das análises por microscopia óptica (MO) e de dureza, as amostras “A” foram atacadas com Nital, com concentração 2%, em diferentes tempos, sendo o AISI 1045 com 5 segundos, AISI H13 20 segundos, AISI 4340 com 5 segundos e o AISI D6 com 12 segundos.

O procedimento foi repetido após a realização dos tratamentos térmicos, sendo que as amostras “A” necessitaram apenas das lixas G400, G600 e G1200 para a retirada de óxidos provenientes dos tratamentos realizados nas amostras.

As amostras classificadas como “B”, foram apenas lixadas com G80 na parte externa, afim de retirar alguns óxidos do material para posterior ensaio de ressonância para a obtenção do módulo elástico do material.

5.2.2 Microscopia Óptica

As imagens de microscopia óptica, foram obtidas em um microscópio óptico marca da Zeiss, modelo AX10, analisadas no programa *axiovision rel 4.8*.

Foram obtidas imagens das amostras “A” antes do tratamento de têmpera e após o revenimento, de modo que fosse possível avaliar o efeito dos tratamentos térmicos.

5.2.3 Ensaio de Dureza

As amostras designadas como “A” foram submetidas ao ensaio de dureza Rockwell na escala B em um duromêtro da marca Insize, do modelo ISH – RSR150,

com uma pré – carga de 980,7 N, com uma esfera de diâmetro de 1,588 mm e com um tempo de indentação de 5 segundos. Para cada amostra classificada como “A”, foram realizadas 6 medidas, sendo 3 na parte central da amostra e as outras 3 na borda da amostra, totalizando 6 medidas cada amostra. O mesmo procedimento foi repetido após as amostras “A” passarem pelos tratamentos térmicos de têmpera seguido por revenimento.

Como mostrado na figura 12, as amostras passaram por indentações na parte da borda e também na parte central. Os ensaios foram realizados de acordo com ABNT NBR ISO 6508-1:2019, com indentações na parte da borda feitas a fim de evitar os possíveis efeitos de borda no resultado dos ensaios dos materiais.

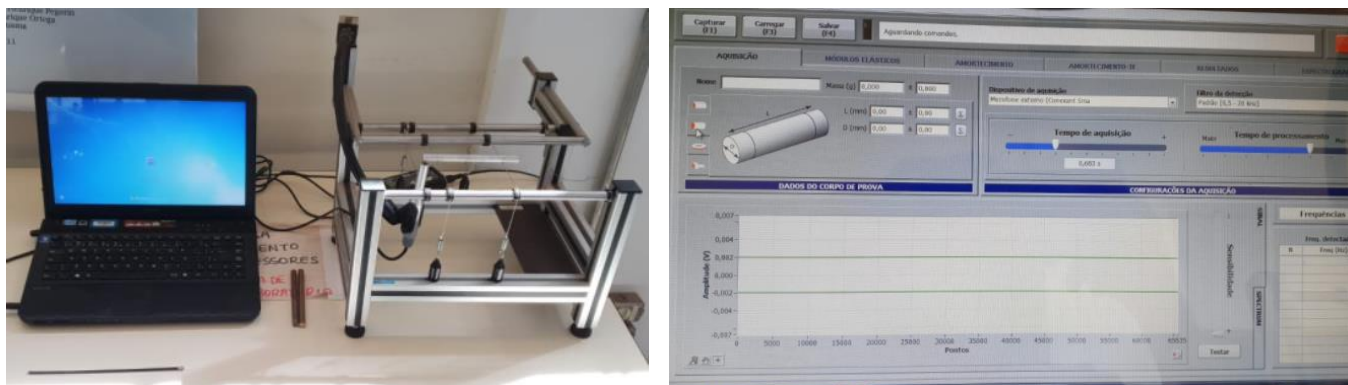
Figura 12 - Indentações na parte central e na borda da amostra com raio de 25,4 mm de um AISI 1045



Fonte: Autoria própria.

5.2.4 Ensaio de Ressonância

Figura 13 – Equipamento Sonelastic® utilizado para a aplicação do ensaio de ressonância



Fonte Autoria própria.

Para a determinação dos módulos elásticos das amostras, foi utilizado o equipamento Sonelastic®, o qual através da aplicação de um golpe em uma de suas extremidades, com uma haste de polímero com um pino metálico em sua ponta, excita as amostras, e o equipamento, através de um microfone localizado na extremidade oposta, capta o som emitido onde é possível detectar e obter suas frequências de ressonância. Com a ajuda do *software* Sonelastic® 2.8, é possível transformar esses resultados através de relações matemáticas, e obter assim o módulo elástico do material (COSSOLINO & PEREIRA, 2010).

Para a realização do ensaio, com a ajuda de um paquímetro digital e uma balança digital, foram determinadas o peso e comprimento das amostras. Após a inserção dos dados no equipamento, junto ao seu raio já conhecido, foram então estabelecidos os seus pontos nodais, ou seja, pontos onde a amplitude de vibração é zero, e onde as amostras devem ser posicionadas. O tempo de aquisição utilizado foi de 0,683 segundos.

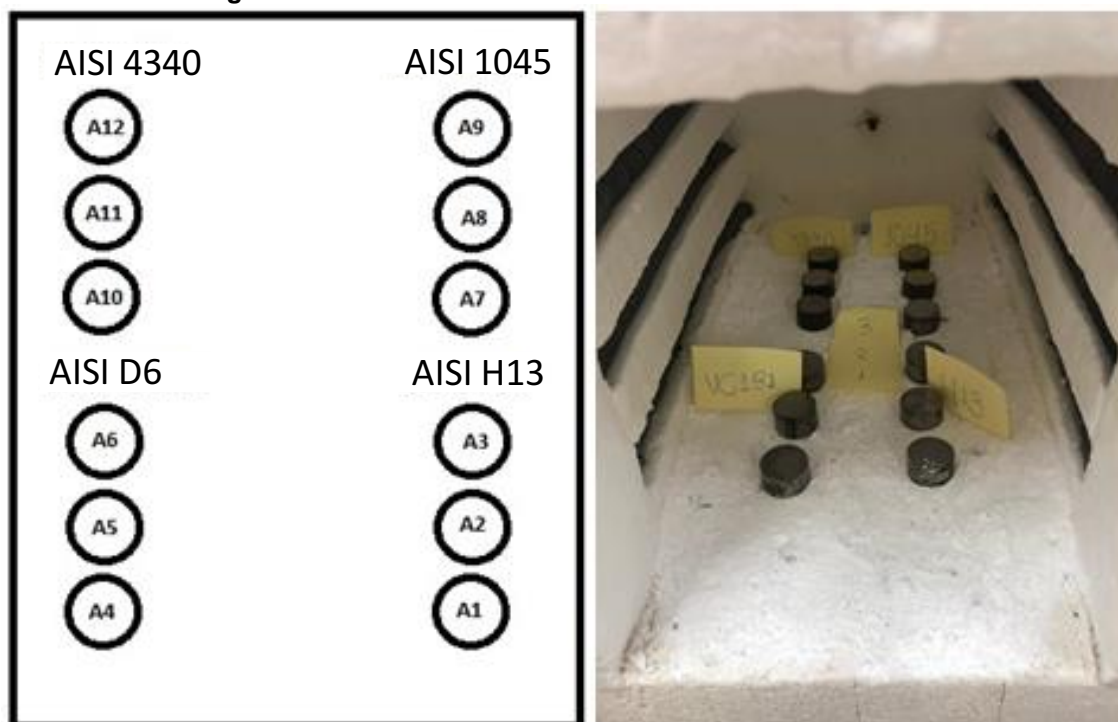
Os ensaios foram realizados no modo flexional de acordo com a norma ASTM E1876-15. Como forma de manter um padrão para os ensaios, assim como a respeito da norma, todos os procedimentos foram feitos mantendo o transdutor captador de som, assim, os golpes realizados pela haste estão nos mesmos locais em todos os ensaios.

5.2.5 Tratamento Térmico

Após os ensaios iniciais, as amostras foram levadas ao forno mufla JUNG, modelo 1712. Tanto o grupo de amostras “A”, como o grupo de amostras “B”, passaram pelos procedimentos de têmpera e de revenimento. O meio de resfriamento utilizado foi o óleo.

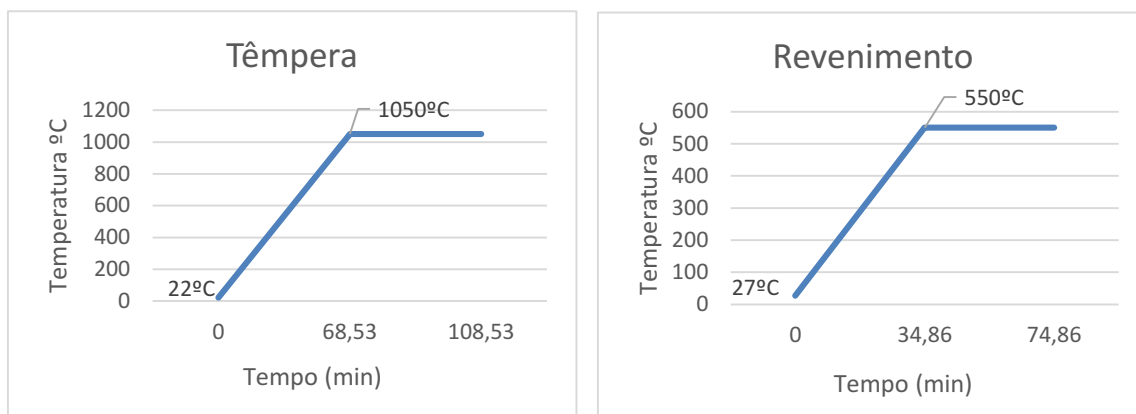
As amostras “A” e “B” foram posicionados no forno como mostra a figura 14.

Figura 14 - Posicionamento das amostras dentro do forno



Fonte: Autoria própria.

As taxas utilizadas para o aquecimento do forno foram iguais para têmpera e para o revenimento, sendo 15°C/min. O tempo de encharque para as amostras foi de 40 minutos. O procedimento foi o mesmo para as amostras A e B como descrito pela figura 15.

Figura 15- Ciclos de tratamentos térmicos de têmpera e revenimento

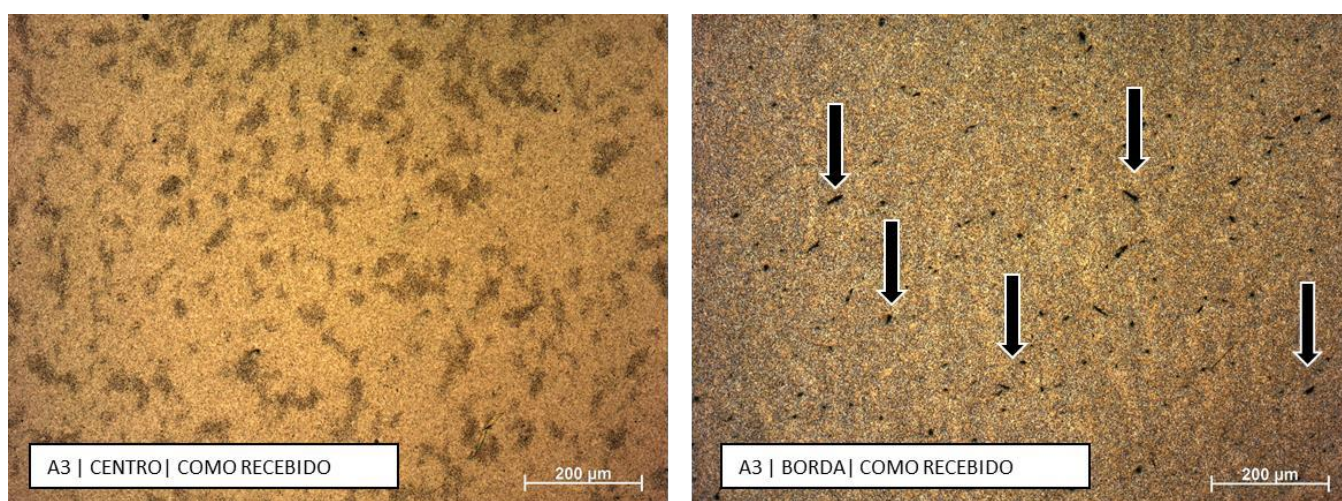
Fonte: Autoria própria.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 AISI H13

Ao analisar as micrografias das estruturas do aço AISI H13, representado pela figura 16, aumentado 100x da parte central da amostra, assim como fora recebido, é observado estruturas não muito bem definidas. Na imagem, observa-se microestruturas atacadas com nital, na qual é encontrado colônias de perlitas precipitadas em uma matriz ferrítica, com contornos de grão não muito bem definidos (GABARDO, 2008). É possível observar também, na amostra, alguns pontos pretos, o que pode indicar a presença de algumas inclusões ou óxidos na peça.

Figura 16: Metalografia AISI H13 como recebido ampliado 100x. As setas indicam possíveis inclusões na amostra



Fonte: Autoria própria.

As inclusões de todos os tipos devem ser monitoradas de perto, observando sua morfologia, tamanho e distribuição, para que não prejudique o desempenho do material durante a sua aplicação (ABRAHAM *et al.*, 2013). A presença de alguns pontos pretos na figura 16, principalmente em uma quantidade superior na borda do material quando comparado ao centro, pode indicar a presença de inclusões exógenas, oriundo do processo de laminação do material, assim como detalhado pelo fabricante, que podem ser prejudiciais ao material dependendo de sua aplicação.

É possível perceber, da mesma forma, que as amostras como recebido, possuem diferentes características em suas estruturas, tanto na parte central como em sua borda indicada na figura 16. Segundo o certificado de qualidade fornecido pela Villares Metals, as barras redondas como recebidas foram laminadas, o que explica o fato da estrutura de sua borda estar com seus grãos alinhados na direção da laminação, apresentando um leve encruamento quando comparado ao centro da amostra.

Vale ressaltar que os valores de dureza obtidos durante o ensaio se aproximam dos valores fornecidos pela ficha técnica da Villares Metals, ficando um pouco abaixo da média (dureza máxima de 207 HB – equivalente a 92,3 HRB), como observado na tabela 3 (PERFILVILLE, 2021).

Tabela 3: Ensaio de dureza (HRB) como recebido das amostras da liga AISI H13

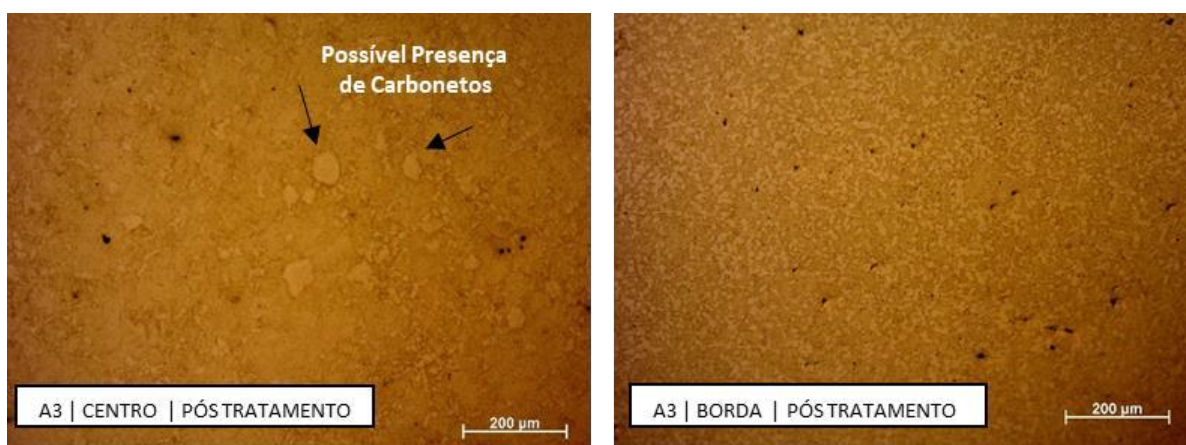
AISI H13			
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Centro (HRB)	73,20	82,40	83,90
	87,30	79,40	86,70
	79,80	87,60	80,80
Média c/ amostra	80,10	83,13	83,80
Média Centro total 82,34			
Borda (HRB)	88,30	79,40	92,80
	79,50	72,40	90,70
	85,40	88,80	76,80
Média c/ amostra	84,40	80,20	86,77
Média borda total 83,79			

Fonte: Autoria própria.

A figura 17 que representa a microestrutura das amostras após os tratamentos de têmpera e de revenimento, possuem características distintas se comparada à figura 16. Em todas as amostras foram observadas martensita revenida, que provavelmente resultará em ganhos de tenacidade nas amostras temperadas (VALES, 2010), o que será melhor observado nas figuras com maiores ampliações, com grãos bem definidos, sendo que na borda há a existência grãos mais refinados, menores, muito provavelmente pelo fato de a parte central da amostra ter sofrido menos com a variação de choque térmico durante a realização da têmpera, ficando mais encharcada e conseqüentemente apresentar grãos maiores. Isso demonstra que o tratamento térmico realizado na amostra se apresentou eficiente.

Outro ponto observado são os possíveis carbonetos secundários que foram formados durante os tratamentos indicados pelas setas na figura 17, devido à alta presença de elementos de liga como o cromo, vanádio e tungstênio, por exemplo. Esses elementos de liga possuem estrutura cristalina CCC (SERNA, 2008). Dessa forma, a inserção de carbonos em suas estruturas para a formação de carbonetos faz com que se formem novas disposições cristalinas que trazem, conseqüentemente, uma maior estabilização ao material, diminuindo a energia interna do sistema.

Figura 17 - Metalografia do aço AISI H13 após tratamentos térmicos de têmpera e revenimento com uma ampliação de 100x. Setas indicam a formação de possíveis carbonetos



Fonte: Autoria própria.

Outro fator muito importante observado na figura 17 é o fato de sua borda possuir maior presença de ferrita (fase) quando comparado ao centro. Considerando que para tratamentos térmicos em aços ferramentas é mais comum a utilização de fornos à vácuo com resfriamento por gás em alta pressão, que fazem a função de retirar elementos da atmosfera que possam causar a decarbonetação e oxidação, é possível observar que a borda sofreu mais com esse efeito quando comparado ao centro, devido ao fato do forno não possuir uma atmosfera controlada (VALES, 2010).

Outro ponto importante a ser destacado é o fato de a figura 17 apresentar amostras com um menor índice de pontos pretos, o que indica que parte dessas inclusões podem ter dissolvido durante os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, o que pode colaborar com o material também em ganhos de propriedades mecânicas.

Com os valores obtidos no ensaio de dureza Rockwel na escala B (HRB) na tabela 4, foi possível observar valores superiores quando comparados com a tabela

3, o que indica mais um ponto de eficiência dos tratamentos realizados. Por ser um aço ferramenta, normalmente esses aços são fornecidos com baixos valores referentes à sua dureza para que sejam facilitados os processos de manufatura no material, o que conseqüentemente lhe fornece um grande ganho de dureza quando tratado termicamente (ANDREASSA, 2016).

Tabela 4 - Ensaio de dureza (HRB) após os tratamentos térmicos das amostras da liga AISI H13

AISI H13			
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Centro (HRB)	107,8	112,2	109,1
	112,2	114,5	111,5
	104,0	114,3	109,5
Média c/ amostra	108,0	113,7	110,0
Média centro total 110,6			
Borda (HRB)	113,0	111,2	116,1
	113,5	112,5	113,9
	109,3	114,1	113,4
Média c/ amostra	111,9	112,6	114,5
Média borda total 113,0			

Fonte: Autoria própria.

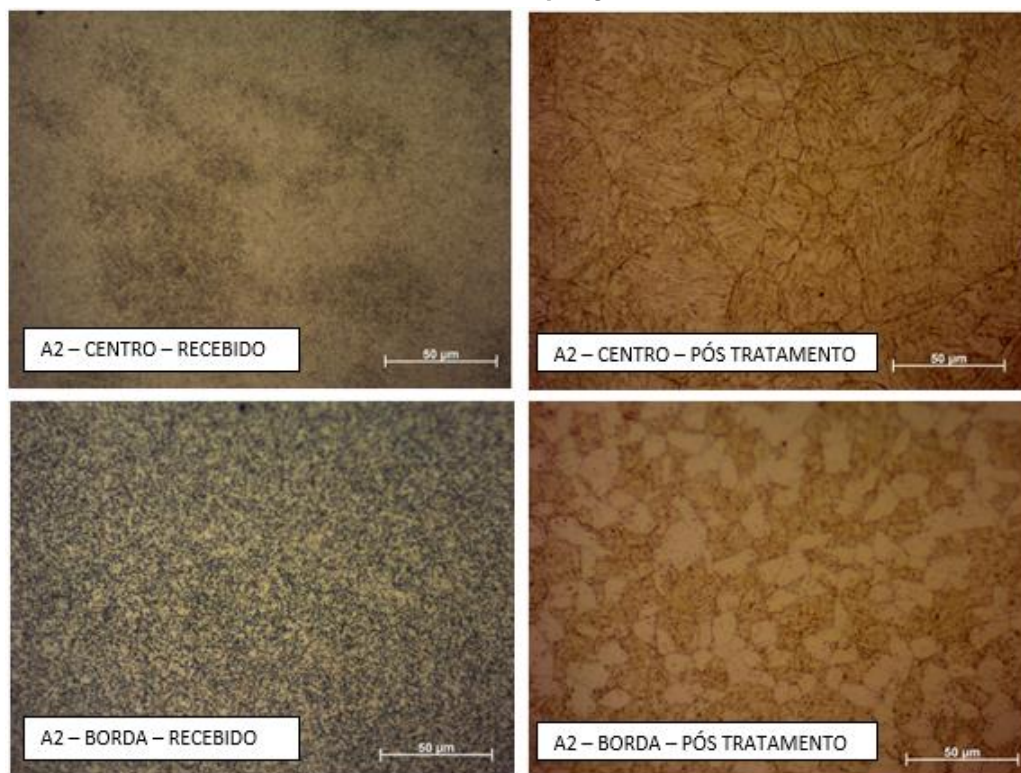
De acordo com Totten (2006), os endurecimentos secundários causam picos de dureza na amostra, assim como constatado na tabela 4, onde a maioria de carbonetos secundários formados nessa faixa de temperatura de revenimento são $Me_{23}C_6$ e Me_6C .

Na figura 18 com uma ampliação de cerca de 500x, foi possível observar a presença de martensita revenida, dentro de grãos muito bem definidos e não homogêneos em uma matriz ferrítica, quando comparados às amostras como recebidas, com colônias de perlitas dispersas em uma matriz ferrítica. A figura 18 defini com uma maior clareza quando comparada à figura 17. Na borda da amostra, pós tratamento, é visível também uma quantidade maior de sítios ferríticos, quando comparada ao centro. O mesmo efeito da descarbonetação pode ser observado na amostra "A2" borda.

Quando um material apresenta em suas características um menor tamanho de grão e conseqüentemente um maior número de fronteiras por unidades de volume entre as fases presentes, a sua deformação plástica é dificultada, o que representa valores mais robustos de dureza (CALLISTER, 2008). Na figura 18, houve um

aumento do tamanho de grão e da martensita do centro em relação à borda, com presença de grãos mais heterogêneos, fazendo com que o material apresentasse valores de dureza maiores da borda em relação ao centro, principalmente nas amostras “A1” e “A3”.

Figura 18: Metalografia do aço AISI H13 após os tratamentos térmicos de têmpera e de revenimento com ampliação de 500x



Fonte: Autoria própria.

Ao analisar os dados obtidos através do ensaio de ressonância, observa-se, assim como de acordo com Callister (2008), que os valores de módulo elástico como recebido estão em conformidade com o observado na literatura. Ao analisar as amostras após os processos de tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, é observado que houve um acréscimo de cerca de 5% de aumento nos valores obtidos de módulo elástico em comparação ao material recebido, demonstrando os ganhos de propriedades que o tratamento térmico trouxe ao material.

Tabela 5 – Módulos elásticos determinados através do ensaio de ressonância das amostras do aço AISI H13 em dois momentos, como recebido e após tratamentos térmicos (têmpera e revenimento)

	Amostra	Módulo Elástico (GPa)	Com o erro Associado (GPa)
Como Recebido	1	207,81	0,26
	2	207,48	0,25
	3	210,72	0,25
Após os processos de Têmpera e Revenimento	1	220,43	0,25
	2	218,34	0,26
	3	221,63	0,25

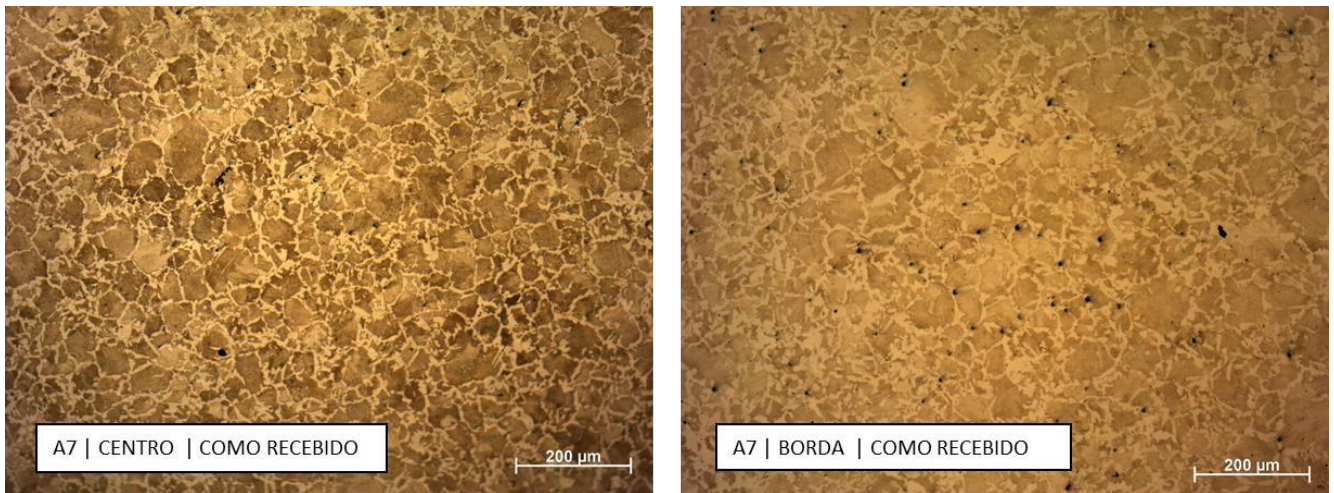
Fonte: Autoria própria.

6.2 AISI 1045

A metalografia realizada no aço AISI 1045 observado na figura 19 demonstra grãos muito bem definidos de perlita em uma matriz ferrítica, típica de aços com teor médio de carbono, com a parte mais clara sendo composta pela ferrita e a parte mais escura sendo a perlita (FERREIRA et al., 2004). Ao se comparar também a figura 16 com as amostras como recebido do aço H13, é visto uma predominância de grãos muito mais bem definidos de perlita quando comparado as amostras do H13, com contornos de grãos mais claros e visíveis.

É possível ainda observar que, na figura 19, na amostra como recebida, há presença de diversos pontos pretos, assim como observado na figura 16 do aço AISI H13. Assim como mencionado nas amostras do aço anterior, tal presença se justifica por conta do processo de laminação que o aço passou, podendo ter ocorrido o mesmo fenômeno referente ao aço H13 na figura 16, de inclusões exógenas no aço, principalmente observado na borda da amostra "A7".

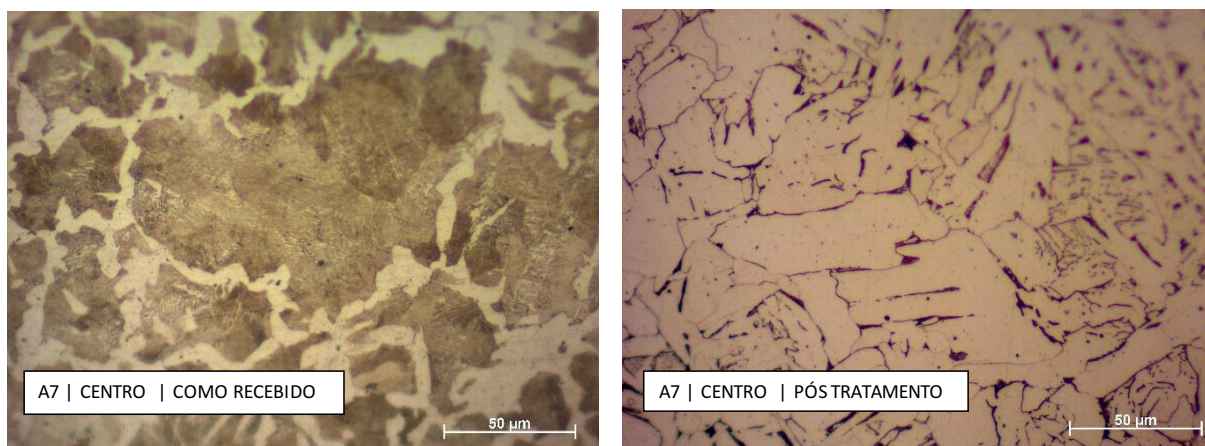
Figura 19 – Metalografia AISI 1045 como recebido ampliado 100x



Fonte: Aatoria própria.

Na figura 20 mostra uma possível ação do processo de difusão atômico ocorrido nas amostras, constatando a formação de partículas muito menores e finas de perlita, em uma matriz ferrítica, gerando uma maior área de interface entre as fases que atuam nas barreiras à propagação de discordâncias, o que gera, conseqüentemente, um ganho de propriedades mecânicas no material (CALLISTER, 2008). Se compararmos as figuras 19 e 20, é constatado que os pontos pretos predominantemente presentes nas amostras antes dos tratamentos realizados aparecendo em menor escala, ou nulo, quando a amostra passou pelos procedimentos de tratamentos térmicos. Esse fenômeno se dá pela segregação de carbono nesses defeitos do reticulado, no caso de apresentarem poros, ou no caso mais provável das amostras, assim como observado no caso do AISI H13, uma dissolução dessas inclusões exógenas presentes nas amostras.

Figura 20 – Amostra “A7” do aço AISI 1045 ampliado 500x em dois momentos, como recebido e após os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento



Fonte: Autoria própria.

Vale ressaltar que as durezas obtidas do aço como recebido conforme a tabela 6 (A), estão em conformidade com aqueles dados apresentados como padrão pela fornecedora do material.

Tabela 6 - Ensaio de dureza (HRB) das amostras da liga AISI 1045 em dois diferentes momentos, como recebido (A) e também após os procedimentos de têmpera e revenimento (B)

A)				B)			
AISI 1045				AISI 1045			
	Amostra 7	Amostra 8	Amostra 9		Amostra 7	Amostra 8	Amostra 9
Centro (HRB)	89,4	93,9	87,2	Centro (HRB)	81,8	77,4	74,5
	94,6	94,5	82		79	74,9	80,1
	93,7	92,3	85		83,4	85	85,3
Média c/ amostra	92,6	93,6	84,7	Média c/ amostra	81,4	79,1	80,0
	Média centro total 90,3				Média centro total 80,2		
Borda (HRB)	87,8	97,1	83,9	Borda (HRB)	79,8	76,7	82,2
	96,4	98,8	91,9		77,6	81,8	83,5
	90,2	95,4	95,6		82,8	81,5	82,7
Média c/ amostra	91,5	97,1	90,5	Média c/ amostra	80,1	80,0	82,8
	Média borda total 93,0				Média borda total 81,0		

Fonte: Autoria própria.

Partindo desse princípio, analisando a tabela 6 (B), com os dados obtidos de dureza durante os procedimentos, foi observado uma queda de valores de dureza, o que indica que o tratamento térmico realizado AISI 1045, não foi efetivo.

Apesar do maior aquecimento no campo austenítico do material do que o recomendado pelo fabricante - provocando um maior difusividade atômica no campo austenítico, e promovendo assim um maior crescimento de grão e uma consequente

maior homogeneização das amostras, além de uma menor área disponível para a taxa de formação de núcleos de perlita, fazendo com que a têmpera seja mais efetiva - , não foram suficientes para que a amostra apresentasse um ganho de dureza em suas propriedades finais. Os valores ficaram abaixo até em comparação com os valores de revenimento fornecidos pelo fabricante.

No entanto, é importante observar dois fatos. Nas figuras 19 e 20, observou-se que as amostras, após passarem pelos procedimentos de têmpera e revenimento, apresentaram em suas estruturas campos ferríticos muito maiores que quando comparados às amostras sem tratamentos. Tal fato pode ter ocorrido por um processo de descarbonetação da amostra, já que essa foi tratada em um forno sem a atmosfera controlada, o que pode ter prejudicado os dados obtidos de dureza nos ensaios. Além disso, se assumirmos que as amostras do AISI 1045 estavam posicionadas no fundo do forno e foram as últimas amostras a serem retiradas, como registrado na imagem 14, possuindo uma variação de temperatura na abertura do forno para retirada de cada uma das amostras anterior às da AISI 1045, e ao retirar essas amostras de AISI 1045 e imergir em óleo, essas já se encontravam em 96 °C, temperatura esta aferida por um termômetro, onde foi constatado que essas passaram por um processo com menor taxa de resfriamento, quando comparado com as outras amostras de outros tipos de aços, podendo não ter um efetivo tratamento de têmpera.

Diferentemente do aço AISI H13, o aço AISI 1045 além de sofrer com o fato de que possa ter ocorrido uma descarbonetação de sua superfície, devido ao fato de a atmosfera do forno não ser controlada, o aço não possui elementos de liga formadores de carbonetos secundários como o AISI H13 - que trazem ao material ganhos de propriedade mecânica -, o que podem ter compensado esse ganho de propriedade do material ao se comparar com o AISI 1045.

Ao contemplar os resultados obtidos pelo ensaio de ressonância, apresentados na Tabela 7, observaram-se módulos elásticos contrários aos indicados nos resultados obtidos de dureza. O ensaio de ressonância indica um ganho de resistência no material com a aplicação dos tratamentos térmicos realizados, apresentando valores superiores após a realização dos tratamentos térmicos quando comparado com as amostras como recebido. Os dados reforçam que o processo de descarbonetação, gerado por uma atmosfera de forno não controlada, possa ter sido prejudicial aos resultados obtidos do material.

Tabela 7 - Módulos elásticos determinados através do ensaio de ressonância das amostras do aço AISI 1045 em dois momentos, como recebido e posterior aos tratamentos térmicos de têmpera e de revenimento do material

	Amostra	Módulo Elástico (GPa)	Com o erro Associado (GPa)
Como Recebido	7	205,21	0,24
	8	207,34	0,24
	9	207,72	0,24
Após os processos de Têmpera e Revenimento	7	210,74	0,25
	8	209,61	0,26
	9	213,64	0,25

Fonte: Autoria própria.

6.3 AISI 4340

Analisando a tabela 8, os valores de dureza Rockwell B estão condizentes com aqueles fornecidos pela fornecedora do material.

Tabela 8 - Ensaio de dureza (HRB) das amostras da liga AISI 4340 como recebido

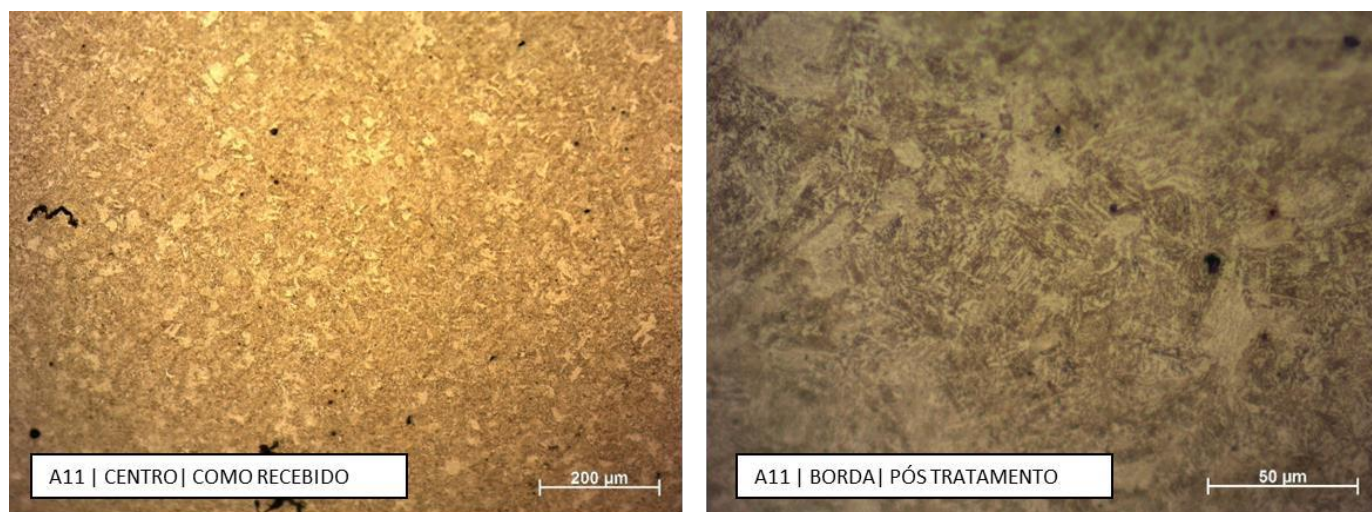
AISI 4340			
	Amostra 10	Amostra 11	Amostra 12
Centro (HRB)	105,2	92,9	103,2
	103,9	104,2	105,3
	102,3	105,7	102,4
Média c/ amostra	103,8	100,9	103,6
Média centro total 102,8			
Borda (HRB)	104,9	106,4	106,3
	104,5	106,6	106,4
	105	105	107,5
Média c/ amostra	104,8	106,0	106,7
Média borda total 105,8			

Fonte: Autoria própria.

Na metalografia da imagem 21, foi observado que a amostra do aço AISI 4340 como recebido apresenta uma estrutura com perlitas muito finas em uma matriz ferrítica, com partículas muito pequenas, muito parecidas com as encontradas em Colpaert (2008), dispersas em uma matriz ferrítica, sendo um material extramamente duro, devido também ao grande número da área de fronteiras por unidade de volume

entre as fases, assim como as finas partículas de cementita, tendo um aspecto mais parecido com a figura 16 do que com a figura 19.

Figura 21 – Amostra A11 do aço AISI 4340 como recebido, com ampliações de 100x (esquerda) e 500x (direita)



Fonte: Autoria própria.

Com os dados da tabela 9, foi possível observar que os resultados obtidos de dureza das amostras da liga AISI 4340 não apresentaram resultados superiores aos demonstrados pela tabela 8.

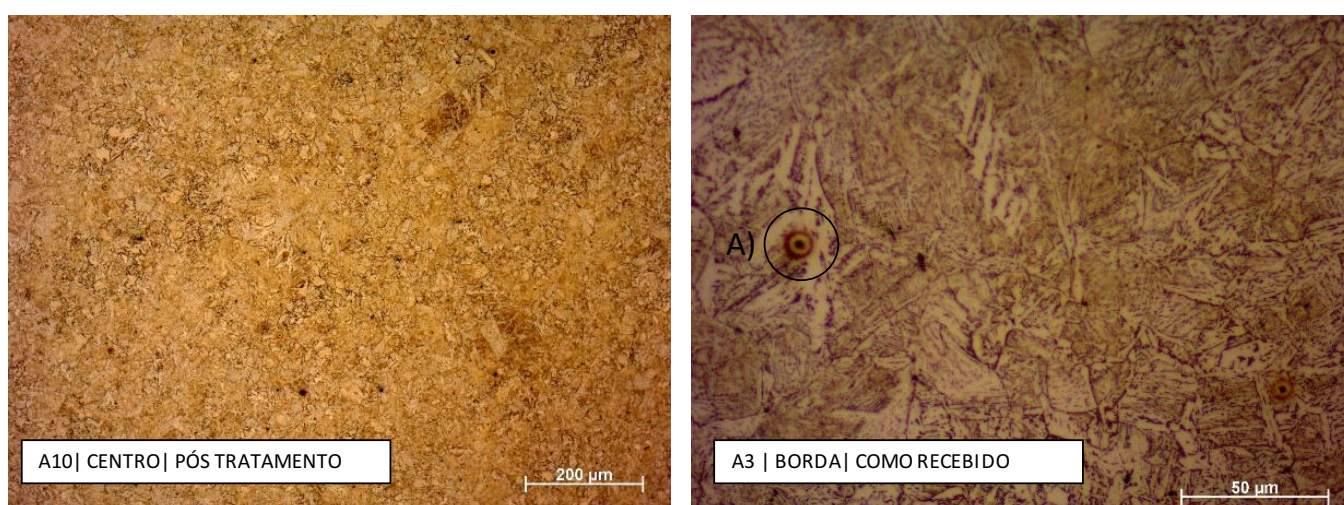
Tabela 9 - Ensaio de dureza (HRB) após dos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento das amostras da liga AISI 4340

AISI 4340			
	Amostra 10	Amostra 11	Amostra 12
Centro (HRB)	96,5	98,4	98,1
	103,5	104	101
	102,7	104,7	97,4
Média c/ amostra	100,9	102,4	98,8
Média centro total 100,7			
Borda (HRB)	98,8	93,9	100,3
	98,3	100,9	100
	91,8	98,8	100,9
Média c/ amostra	96,3	97,9	100,4
Média borda total 98,2			

Fonte: Autoria própria.

Na figura 22, tanto na ampliação com 100x, como a com 500x, é possível observar estruturas tipicamente de martensita revenida, com finas camadas perlitas em uma matriz ferrítica junto a precipitações secundárias de carbonetos de liga estáveis na matriz formadas por difusões substitucionais devido à presença de elementos de liga como o cromo, assim como descrito por Totten (2007), dispersos na matriz, assim como encontrado por Ladeira *et al.* (2017).

Figura 22 – AISI 4340 após os tratamentos térmicos de têmpera e de revenimento com duas ampliações distintas, sendo de 100x (esquerda) e 500x (direita). Ponto descrito pela letra A) indica uma possível presença de umidade durante a análise



Fonte: Autoria própria.

Esses carbonetos secundários formados em temperaturas mais elevadas de revenimento, como realizado nesse trabalho, foram constatados por Lee e Su (1999) em que os carbonetos formados são tipo Cr_7C_3 , mas não transformados diretamente pelos do tipo Fe_3C , mas sim ocorrem de forma simultânea sendo que o carboneto de ferro é dissolvido na matriz e simultaneamente ocorre a precipitação do carboneto de cromo. Eles observaram também uma densidade de discordâncias menor nesses níveis de temperatura de revenimento, o que pode explicar também que apesar dos carbonetos formados, as durezas obtidas no trabalho apresentaram níveis inferiores quando comparadas aos das amostras como recebido.

Analisando-se as imagens de microscopia óptica para as amostras temperadas e revenidas do aço AISI 4340, é possível verificar que as altas temperaturas de revenimento aplicados nas amostras, o que torna a microestrutura

mais difusa, fez com que a martensita obtida perdesse um pouco de sua característica mais acircular, devido a descarbonetação ocorrida durante os tratamentos térmicos, que são provocados pela falta de uma atmosfera controlada, formando uma microestrutura conhecida como sorbita, que é comum em temperaturas elevadas, compostas por ferrita e cementita, assim como encontrado por Oliveira (2014). O mesmo parecer é descrito por Nikikov (1994).

Os valores de dureza registrados após o tratamento estão abaixo do que os fornecidos pelos fabricantes.

Os pontos (A) mostrados na figura 22 podem ser decorrentes de umidade na amostra, ou até mesmo de tensões superficiais oriundas da água que fazem com que o nital 2% possivelmente não conseguiu revelar aquela região demarcada.

Quando comparado ao AISI H13, é possível observar uma maior quantidade de elementos de liga presentes nas amostras de AISI H13 fizeram com que os resultados obtidos fossem superiores em questão de dureza.

Quando analisado os dados da tabela 10, é possível verificar que os resultados sofreram pouca variação se compararmos os dois momentos distintos, sendo como recebido e posteriores aos tratamentos de têmpera e revenimento, o que vai de encontro à teoria de um aumento de propriedades mecânicas através dos tratamentos térmicos realizados, já que com uma estrutura sorbita, o resultado esperado seria uma variação um pouco maior quanto aos valores de módulo elástico do material. Os resultados podem também estar associados à execução do procedimento, bem como o posicionamento correto da amostra, ou dados registrados no momento do ensaio.

Tabela 10 - Módulos elásticos determinados através do ensaio de ressonância das amostras do aço AISI 4340 em dois momentos, como recebido e posterior aos tratamentos térmicos de têmpera e de revenimento do material

	Amostra	Módulo Elástico (GPa)	Com o erro Associado (GPa)
Como Recebido	10	209,97	0,24
	11	207,93	0,24
	12	207,12	0,24
Após os processos de Têmpera e Revenimento	10	208,33	0,24
	11	207,99	0,24
	12	208,5	0,23

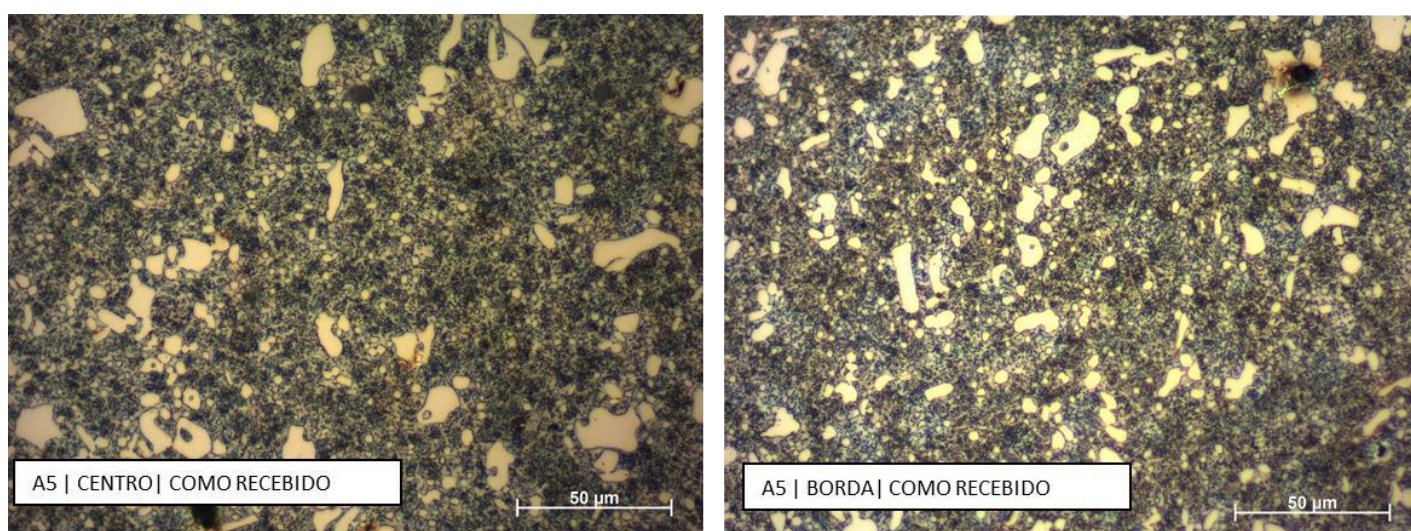
Fonte: Autoria própria.

6.4 AISI D6

Na figura 23, composta pela amostra “A5” do aço AISI D6 como recebido ampliada 500x, é observado uma clara presença dos elementos de ligar formadores de carbonetos primários dispersos em uma matriz ferrítica do material, que geralmente estão na forma de Me_7C_3 . Tanto na borda quanto no centro das amostras dos trabalhos, foi notado o mesmo padrão de fase estabelecido, com estruturas pequenas.

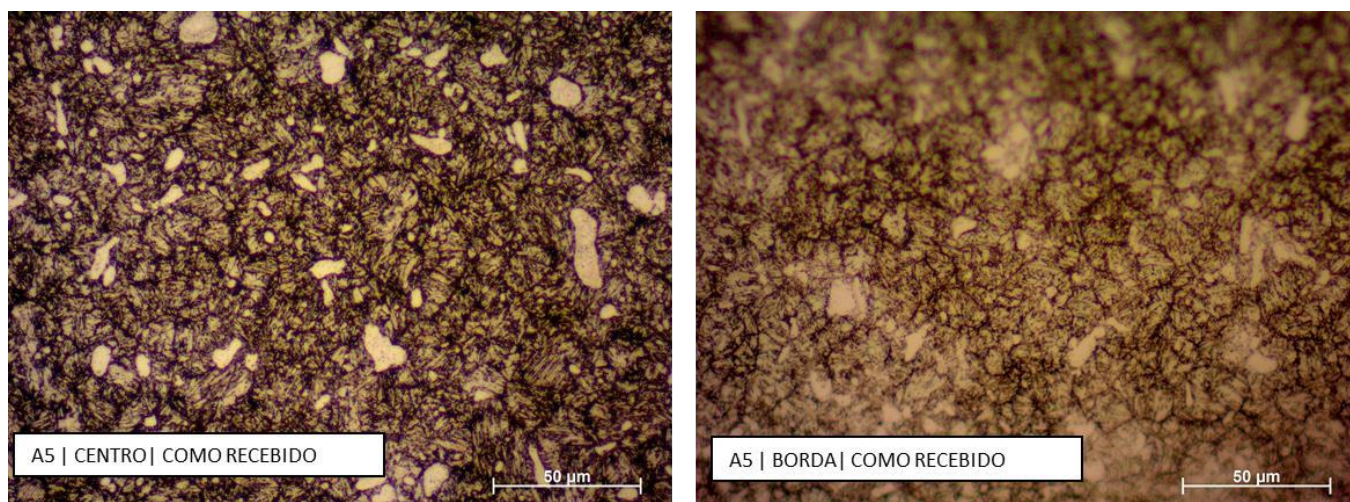
Se compararmos os dois momentos registrados, tanto na figura 23 como na 24, principalmente nas amostras com ampliação de 500x, foi observado uma estrutura muito mais agulhada de martensita revenida, com perlitas muito finas dispersas na matriz.

Figura 23 – Aço AISI D6 como recebido com ampliação de 500x



Fonte: Autoria própria.

Figura 24 - AISI D6 após tratamentos térmicos de têmpera e de revenimento com ampliação de 500x



Fonte: Autoria própria.

Assim como observado por Américo (2007), a maior temperatura de austenização utilizada no trabalho fez com que fosse possível ocorrer na amostra uma maior dissolução de carbonetos primários, ainda no momento da realização da têmpera no material, mesmo que a estrutura ainda apresente alguns desses carbonetos, como visto na figura 24. Porém, diferentemente do que foi observado por Américo (2007), as amostras do aço AISI D6 não apresentaram crescimento de grãos exagerados, mesmo após a utilização de temperaturas de austenitização acima do padrão. Com isso, essa temperatura de austenização, junto à precipitação de carbonetos secundários na faixa de temperatura de revenimento por volta de 550°C, fez que a amostra do aço AISI D6 apresentasse dados de ganho de dureza em relação ao recebido, como observado na tabela 11.

Tabela 11 - Ensaio de dureza (HRB) como recebido (A) a após os tratamentos térmicos das amostras da liga AISI D6 (B)

A)				B)			
AISI D6				AISI D6			
	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6		Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6
Centro (HRB)	86,9	87,7	95,5	Centro (HRB)	103,8	111,4	108,9
	87,8	94,5	96		110,1	108,6	114,6
	86,4	90,2	94,6		111	110,1	115,9
Média c/ amostra	87,0	90,8	95,4	Média c/ amostra	108,3	110,0	113,1
Média centro total 91,1				Média centro total 110,5			
Borda (HRB)	90,1	87,4	98,2	Borda (HRB)	112,7	114,6	99,6
	88,3	92,5	98,3		107,5	110,1	99,3
	86,2	92,5	96,4		111,9	114,8	112
Média c/ amostra	88,2	90,8	97,6	Média c/ amostra	110,7	113,2	103,6
Média borda total 92,2				Média borda total 109,2			

Fonte: Autoria própria.

No entanto, apesar de tal ganho, uma observação importante diz respeito a uma possível fragilização causada pelo revenimento, já que possui em sua composição, uma grande quantidade de elementos de liga que podem deslocar a transição dúctil-frágil para temperaturas significativamente mais elevadas, causando uma fragilidade no material. Importante ressaltar que a dureza estabelecida e encontrada no material se mostra inferior àquela destacada pelo fabricante. Comparado aos outros aços do presente trabalho, o aço AISI D6 está muito mais sujeito a este tipo de fenômeno por apresentar, em sua composição, altas taxas de elemento de liga, como Cr e elevado teor de C por exemplo, diferentemente dos demais.

Vale ressaltar também que devido ao excesso de carbono presente em sua composição, as amostras de AISI D6 não responderam aos tratamentos térmicos quando comparado com as amostras das demais ligas empregadas neste trabalho, ainda que a descarbonetação possa ter prejudicado de alguma maneira os resultados desta liga de teor de carbono mais elevado.

Os dados obtidos através dos ensaios de ressonância dispostos na Tabela 12 indicaram que os tratamentos térmicos realizados, principalmente o de revenimento, foram efetivos em combinar um ganho de propriedade nas ligas trabalhadas quanto à dureza e ao mesmo tempo fornecer para esta liga um pouco mais de elasticidade, obtendo um ganho de ductilidade que pode ser extremamente útil dependendo da utilização deste.

Tabela 12 - Módulos elásticos determinados através do ensaio de ressonância das amostras do aço AISI D6 em dois momentos, como recebido e posterior aos tratamentos térmicos de têmpera e de revenimento

	Amostra	Módulo Elástico (GPa)	Com o erro Associado (GPa)
Como Recebido	4	216,01	0,25
	5	217,98	0,25
	6	217,68	0,25
Após os processos de Têmpera e Revenimento	4	208,86	0,24
	5	209,32	0,24
	6	207,79	0,24

Fonte: Autoria Própria.

7 CONCLUSÃO

A partir de todos os ensaios realizados nos materiais, foi possível concluir assim como observado na literatura, que os tratamentos térmicos possuem grande influência sobre as características dos materiais apresentados assim como seus parâmetros, possuindo enorme relevância para os fabricantes de aços e seus usuários.

O aço AISI 1045 não apresentou ganhos em suas propriedades mecânicas com os tratamentos térmicos realizados devido ao não controle e execução correta de seu tratamento térmico de têmpera. As amostras do aço AISI 1045, encontravam-se posicionadas no fundo do forno e as constantes aberturas realizadas antes da realização da têmpera nas amostras deste aço, fizeram com que o resultado final fosse prejudicado. Além disso, o fato de o forno não apresentar uma atmosfera controlada durante todo o processo dos tratamentos térmicos fez com que os resultados não fossem efetivos.

Os aços AISI H13 e AISI D6 apresentaram ganhos de dureza quando comparado com o material recebido, assim como dados de módulo de tenacidade satisfatórios, o que faz com que a temperatura de austenitização empregada possa não ter influenciado de maneira negativa suas propriedades mecânicas. No entanto, vale ressaltar que os valores de dureza ficaram abaixo daquelas fornecidas pelos seus respectivos fabricantes.

Importante ressaltar também que para o aço AISI 4340, as altas temperaturas registradas de revenimento fizeram com que sua martensita revenida apresentasse um formato um pouco menos agulhada e com perda de tensões internas que fizeram com que seus valores obtidos de dureza se apresentassem em um nível abaixo do esperado.

Apesar do objetivo de reduzir os gastos energéticos para ganho de propriedades nos materiais, o trabalho não apresentou uma grande efetividade, visto que aços como AISI 4340 e AISI 1045 não apresentaram ganhos de propriedades significativos.

8 SUGESTÕES PARA OS PRÓXIMOS TRABALHOS

A partir dos resultados obtidos no trabalho, como sugestão para dar continuidade ao estudo do trabalho, tem-se:

1. Controle de atmosfera do forno assim como sua temperatura ao retirar as amostras;
2. Ensaio de impacto para avaliar se os parâmetros de revenimento foram efetivos no aumento da tenacidade do material;
3. Realizar ensaios comparativos em diferentes parâmetros, como temperatura de revenimento e de têmpera, a fim de observar os efeitos consequentes das alterações nas propriedades mecânicas dos materiais;
4. Análise de difração de raios X com o objetivo de identificar de fases presentes predominantes.

REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 6508-1:2019**: Ensaio de Dureza Rockwell: Escalas e campo de aplicação para materiais metálicos. Rio de Janeiro, 2019.

ABRAHAM, S.; BODNAR, R.; RAINES, J. Inclusion Engineering and the Metallurgy of Calcium Treatment. In: AISTech, 2013, Pittsburgh. **Proceedings**, Warrendale, 2013. p 1243 – 1257.

AÇOS GERDAU. **Mundo dos aços especiais. Tratamentos Térmicos**. Disponível em:
https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4354027/mod_resource/content/3/Aula%20-%20Tratamentos%20T%C3%A9rmicos.pdf. Acesso em: 17 jun. 2019.

ALMEIDA, T. **Principais Ligas Metálicas utilizadas na indústria**. Disponível em:
<https://industria hoje.com.br/principais-ligas-metalicas-utilizadas-na-industria>. Acesso em: 20 jun. 2019.

AMÉRICO, E. P. **Estudo de Caso: Tratamento Térmico de Punções do Furo da Chapa Lateral de Silos para Armazenagem de Grãos – Indústria Pagé**. 2007. 60f. Trabalho apresentado ao curso de graduação de Engenharia de Materiais – Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

ANDREASSA, F. S.. **Efeito das diferentes condições de resfriamento na dureza, microestrutura e distorção nos aços AISI H13, AISI 5160, AISI O1 e AISI 1045**. 78f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo (USP) – São Carlos, 2016.

ASTM, American Society for Testing and Materials. **ASTM E1876-15:2015**: Standard Test Method for Dynamic Young's and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. West Conshohocken - PA, EUA, 2015.

CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Trad. Sérgio Murilo Stamile, 7th ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CARVALHO, A. R. T. **Estudo da influência da agitação e da severidade de têmpera do meio de resfriamento na determinação de velocidades críticas de têmpera**. Dissertação de Mestrado Profissional. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2004.

CARVALHO, Í. Z. de. **Fragilização por hidrogênio nos aços SAE 4340 (AMS 6414K e AMS 6415S) temperados e revenidos**. 2012. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

CHIAVERINI, V. **Tratamentos Térmicos das Ligas Metálicas**. 1a. ed., Editora Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo-SP, 2003.

COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4. Ed. São Paulo: Blucher, 2008.

COSSOLINO, L. C. & A. H. A. PEREIRA. **Amortecimento: classificação e métodos de determinação**, 2010. Disponível em: <https://sonelastic.com/images/ITC04-ATCP.pdf>, acesso em 17 de junho de 2019.

CULLITY, B. D. **Elements of X-ray diffraction**. Massachusetts - USA: Addison-Wesley Publishing Company, 1978.

DANTAS, V.A.; SILVA JUNIOR, M.Q.; GOMES, A.V.R. Estudo das propriedades mecânicas para diversos tratamentos térmicos do aço ASTM A182 F22. **Anais do 22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências de Materiais**. 2016. Natal - RN. p.6414-6425. Disponível em: <http://www.metallum.com.br/22cbecimat/anais/PDF/305-154.pdf>. Acesso em: 23 jun 2019.

FELÍCIO, E. A. **Estudo da implementação de conceito da produção enxuta para redução de resíduos em uma manufatura do ramo siderúrgico**. Projeto de Conclusão de Curso (Engenharia de Produção). Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF. Juiz de Fora, Minas Gerais 2012.

FERREIRA, C. R.; ARAÚJO, F. G. S.; OLIVEIRA, C. P.; COTA, A. B. Tratamento térmico por indução eletromagnética em tubos de aço SAE 1045 para produção de hastes de sondagem geológica. **Revista Escola de Minas**, v. 57, n. 1, p. 23-26, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0370-44672004000100005>. Acesso em: 05 jul. 2019.

GABARDO, J. F. **Estudo Da Tenacidade Do Aço Ferramenta H13 Estudo Da Tenacidade Do Aço Ferramenta H13**. 2008. 71f. Dissertação do mestrado (Engenharia mecânica) Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2008

GALLO, G. B. **Influência do Tratamento Térmico sobre a Tenacidade de um Aço AISI SAE 1045 com Médio Teor de Carbono Avaliado por Ensaios de Impacto**. 2006. 115 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia do Câmpus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2006.

GOUVEA, 2014. Estudo da influência de tratamentos térmicos sobre a microestrutura de aços H13. Disponível em: <http://repositorio.uem.br:8080/jspui/bitstream/1/3603/1/000220630.pdf>_ Acesso em 23 jun 2019.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Processo Siderúrgico**. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/processo-siderurgico/>. Acesso em: 23 jun. 2019.

KONESHLOO, M.; ALS, K. M.; KHOMAMIZADEH, F. Effect of cryogenic treatment on microstructure, mechanical and wear behaviors of AISI H13 hot work tool steel. **Cryogenics**. Elsevier: **Journal of Materials Processing Technology**. nov.2010. Inpress.

Ladeira, D. G.; Santos, J. A.; Oliveira, G.P; Peçanha, L.A.; Oliveira, M.M; Tomaz, I. V. Avaliação do revenimento na dureza e microestrutura do aço AISI 4340. **Rev. Vertices**. Vol. 19, nº 2, p. 99-105, maio/ago 2017. Disponível em: <https://essentiaeditora.iff.edu.br/index.php/vertices/article/view/7560/7580>. Acesso em: 19 jul 2019. DOI: 10.5935/1809-2667.v19n22017p99-105

LEE, W.; SU, T. Mechanical properties and microstructural features of SAE 4340 high-strength alloy steel under quenched and tempered conditions. Elsevier: **Journal of Materials Processing Technology**, Volume 87, Issues 1–3, 15 March, p.198-206, 1999.

NEVES, O. R.; CAMISASCA, M. M. **Aço Brasil: uma viagem pela indústria do aço**. Belo Horizonte: Ed. Escritório de Histórias, 2013.

NOVIKOV, I. **Teoria dos tratamentos térmicos dos metais**. Rio de Janeiro: Editora da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1994, 568 p.

OLIVEIRA, C. S. de; DENTI, G. B. **Avaliação da tenacidade ao impacto da região revenida pelo passe duplo em soldagem smaw do aço AISI1045**. Projeto de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Espírito Santo – UFES. Vitória, Espírito Santo. 2007.

OLIVEIRA, E. G; **Efeito dos parâmetros de tratamento térmico na microestrutura e nas propriedades dos aços sae 4340 e 8640 temperados e revenidos**. 95f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Materiais) CEFET-MG. Belo Horizonte, 2014.

PEREIRA, Y. **Em reunião com analistas e investidores, CFO e demais líderes da Gerdau discorrem sobre a importância do ESG**. Disponível em: <https://conteudos.xpi.com.br/acoes/relatorios/em-reuniao-com-analistas-e-investidores-cfo-e-demais-lideres-da-gerdau-distorrem-sobre-a-importancia-do-esg/>. Acesso em: 21 mar 2021.

PERFILVILLE. **Tabela de condução de durezas**. Disponível em: <http://www.perfilville.com.br/documentos/0ca476f3fa91eb346c854bd49f2dc99c.pdf>. Acesso em: 21 mar 2021.

REED-HILL, R. E.; ABBASCHIAN, R.; ABBASCHIAN, L. **Physical Metallurgy Principles**. 4. Ed. USA, Stamford: Cengage Learning, 2009.

SERNA, M. M. **Quantificação e identificação de carbonetos no aço ferramenta AISI/SAE M2. Doutorado**. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

SILVA, A. C. M. S. **Tratamento térmico de têmpera no aço SAE 1040 em diferentes meios de resfriamento**. 43f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia de Materiais). Universidade Federal do Sul e Sudoeste Pará – Unifesspa, Marabá, Pará, 2016.

SILVA, A.L.V.C.; MEI, P.R. **Aços e Ligas Especiais: Classificação e seleção de aços - 2 ed**. São Paulo: Edgard Blücher, 2006. 646p.

SILVA, J. P. F. da. **Tratamentos térmicos dos aços AISI H13, AISI D6 e AISI 4340**. 20f. Relatório de Estágio Curricular (Engenharia de Metalurgia e de Materiais). Universidade do Porto – FEUP. Salvador, Bahia, 2005.

SILVA JUNIOR, R. P. da; BIAZOTTO, G. C.; VATAVUK, J.; CALICCHIO, L. **Têmpera de aço sae 1045 utilizando diferentes meios de resfriamento**, p. 1405-1412. In: 71th ABM Annual Congress, Rio de Janeiro, 2016. ISSN: 2594-5327, DOI 10.5151/1516-392X-28088.

SOARES, J. P. **Aços: Características e Tratamentos**. 4. Ed. Porto: Publindústria, 1987.

SOUSA, R. R. M.; MENDES, M. L. M.; VALADÃO, E. M.; BRANDIM, A. S.; OLIVEIRA, M. D.; ALVES, C. Jr. **Aço Ferramenta para Trabalho a Frio AISI D6 Tratado Termicamente e Nitretado em Plasma com Gaiola Catódica**. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**. Teresina, v.27, n.4, p. 223-227, 2008.

TOTTEN, G.E. **Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies**. 2 ed. Portland: CRC Press, 2007.

VALES, S. S. V. **Estudo da influência do tratamento criogênico no aço AISI H13**. 107f. Dissertação de Mestrado (Engenharia de Materiais). Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2010.

VAN VLACK, L. H., **Princípio de Ciência e Tecnologia dos Materiais**, 4^a. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1984.

VENDRAMIM, J.C. **Aços e Processos para a Tecnologia de Vácuo - Parte III**. **Revista Industrial Heating**. Abr-Jun 2014. pp. 51-53. Campinas – SP; Disponível em: <https://www.isoflame.com.br/assets/pdf/artigos/1468270152.pdf>. Acesso em 23 jun 2019.

ZUPPO, R. M. **Análise Comparativa do Efeito da Têmpera e Revenimento e da Austêmpera Seguida ou não de Conformação a Frio na Microestrutura e nas Propriedades do Aço SAE 4140H**. 156f. Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas – Unicamp. Campinas: São Paulo, 2011.