



UNISATC
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALURGICA
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA METALURGICA

Emerson Maximiano Gonçalves

ESTUDO COMPARATIVO DE TEMPERABILIDADE PARA A SUBSTITUIÇÃO DO
AÇO SAE 1045 POR UM AÇO SAE 4140 APLICADO A ENGRENAGENS
FUNDIDAS

Criciúma

2021

EMERSON MAXIMIANO GONÇALVES

**ESTUDO COMPARATIVO DE TEMPERABILIDADE PARA A SUBSTITUIÇÃO DO
AÇO SAE 1045 POR UM AÇO SAE 4140 APLICADO A ENGRENAGENS
FUNDIDAS.**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica da UNISATC, como requisito parcial para à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica. Área de concentração: Processos de Fabricação e seleção de materiais.

Orientador: Dr. Alexandre Milanez

Criciúma

2021

EMERSON MAXIMIANO GONÇALVES

**ESTUDO COMPARATIVO DE TEMPERABILIDADE PARA A SUBSTITUIÇÃO DO
AÇO SAE-1045 POR UM AÇO SAE-4140 APLICADO A ENGRENAGENS
FUNDIDAS.**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica da UNISATC, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica. Área de concentração: Processos de Fabricação e seleção de materiais

A comissão examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação de Mestrado em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Elidio Angioletto
Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

Prof. Dr. Anderson Daleffe
Centro Universitário SATC

Prof. Dr. Luiz Carlos de Cesaro Cavaler
Centro Universitário SATC

SUPLENTE:

Prof. Dr. Daniel Fritzen
Centro Universitário SATC

Criciúma

2021

Dedico esse trabalho primeiramente a Deus, depois a minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado força e saúde nessa etapa importante da minha vida.

Agradeço minha família por todo o apoio, em especial minha noiva.

Agradeço ao Orientador Dr. Alexandre Milanez, por toda dedicação e todos os ensinamentos.

RESUMO

Na escolha do aço para fabricação de engrenagens pelo processo de fundição, considera-se o custo final da peça como um fator importante de análise. Porém a durabilidade da engrenagem é um item importante, que impacta na confiabilidade da peça em operação. Para aumentar a durabilidade da engrenagem é aplicado um tratamento térmico de têmpera, e posteriormente revenimento. Sendo assim, avaliar a temperabilidade do material utilizado na sua fabricação e seu efeito sobre a microestrutura é de suma importância. Para analisar a temperabilidade de um material, é comum utilizar o ensaio Jominy aliado ao ensaio metalográfico. Aliado ao tratamento térmico, a seleção correta do material de fabricação da engrenagem impacta diretamente na durabilidade da peça, buscando diminuir os custos de fabricação de engrenagem. Neste trabalho serão analisadas duas categorias de aços comumente utilizadas para fabricação de engrenagem, comparando suas características metalúrgicas a fim de avaliar a possível substituição de uma engrenagem fabricada em aço SAE-1045 por uma em aço SAE-4140. As ligas ASTM A – 958 Aço 1045 Grau 90/60 e ASTM A – 958 Aço 4140 Grau 90/60 utilizadas neste estudo são capazes de atingir os valores mínimos de propriedades mecânicas que uma engrenagem fundida necessita para operação segundo a norma e os pré-requisitos do cliente. Os resultados indicam que uma engrenagem fabricada em aço fundido SAE-4140 terá melhor desempenho em operação do que a mesma engrenagem fabricada em aço fundido SAE-1045, devido ao seu melhor equilíbrio microestrutural pós tratamento térmico.

PALAVRAS-CHAVE: Ensaio Jominy. Fabricação de engrenagem por fundição. Tratamento térmico de têmpera.

ABSTRACT

When choosing steel to manufacture gears through the casting process, the final cost of the part is considered an important factor of analysis. However, the durability of the gear is an important item, which impacts the reliability of the part in operation. To increase the durability of the gear, a heat treatment of hardening is applied, and subsequently tempering. Therefore, evaluating the hardenability of the material used in the manufacture and its effect on the microstructure is of paramount importance. To analyze the hardenability of a material, it is common to use the Jominy test combined with the metallographic test. Combined with heat treatment, the correct selection of the gear manufacturing material directly impacts the part's durability, seeking to reduce the gear manufacturing costs. In this work, two categories of steels commonly used for gear manufacturing will be analyzed, comparing their metallurgical characteristics to evaluate a possible replacement of a gear made of SAE-1045 steel for one of SAE-4140 steel. The alloys ASTM A - 958 Steel 1045 Grade 90/60 and ASTM A - 958 Steel 4140 Grade 90/60 used in this study are capable of achieving the minimum values of mechanical properties that a cast gear needs to be in operation according to the standard and the prerequisites of the client. The results indicate that a gear made of cast steel SAE-4140 will perform better in operation than the same gear made of cast steel SAE-1045, due to its best microstructural balance after heat treatment.

KEY WORDS: Jominy Test. Manufacturing of gear by casting. Tempering heat treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho esquemático (em corte) do aparato para o ensaio Jominy.	34
Figura 2 - Transformações possíveis envolvendo a decomposição da austenita.....	44
Figura 3 - Micrografia eletrônica de transmissão com a estrutura bainita. Um grão de bainita passa do lado inferior esquerdo para canto superior direito, que consiste de partículas alongadas e em forma de agulha de Fe ₃ C dentro de uma ferrita. A fase em torno da bainita é martensita.....	46
Figura 4 - Micrografia eletrônica de martensita revenida. O revenimento foi realizado a 594°C. As partículas pequenas são de fase cementita; a fase matriz é de ferrita- α . 9300x.	49
Figura 5 - Engrenagem fundida em aço.	51
Figura 6 - Corpos de prova brutos de fundição, onde: a) Metais fundidos desmoldados e b) Corpos de prova já cortadas para serem enviados a usinagem.	52
Figura 7 - Especificação das medidas do corpo de prova para execução do Ensaio Jominy.....	54
Figura 8 - Corpo de prova para execução do teste Jominy.....	55
Figura 9 - Equipamento para o Ensaio Jominy, onde a) sistema de captura de dados de temperatura e b) Teste de avaliação do sistema de resfriamento.....	55
Figura 10 - Procedimento de temperabilidade, Ensaio Jominy, onde a) Termômetros instalados no corpo de prova e b) sentido de resfriamento do corpo de prova	56
Figura 11 - (A) Corpo de prova SAE-1045 cortado; (B) Corpo de prova SAE-1045 cortado; (C) Desenho indicando as distâncias das posições das amostras de 1-> até 6->.....	57
Figura 12 - Ensaio Jominy do aço SAE-1045 através de uma câmera térmica, onde a) representa o corpo de prova a 620°C, b) Corpo de prova a 524°C, c) Corpo de prova a 106°C e d) a temperatura da água em contato com o corpo de prova.....	60
Figura 13 - Metalografias do aço SAE 1045, resfriamento em água, amostras “1->” e “2->”, ataque com ácido nítrico 2% aproximação 100X.....	67
Figura 14 - Metalografia do aço SAE 1045, resfriamento em água, amostras “3->” e “4->”, ataque com ácido nítrico 2% aproximação 100X.....	68
Figura 15 - Metalografia do aço SAE 1045, resfriamento em água, amostras “5->” e “6->”, ataque com ácido nítrico 2% aproximação 100X.....	68

Figura 16 - Metalografias do aço SAE 4140, resfriamento em água, amostras “1->” e “2->”, ataque com ácido nítrico 2% aproximação 100X.....	69
Figura 17 - Metalografias do aço SAE 4140, resfriamento em água, amostras “3->” e “4->”, ataque com ácido nítrico 2% aproximação 100X.....	70
Figura 18 - Metalografias do aço SAE 4140, resfriamento em água, amostras “5->” e “6->”, ataque com ácido nítrico 2% aproximação 100X.....	70

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curvas de resfriamento ao longo de um aço genérico de formato cilíndrico.	31
Gráfico 2 - Efeito do teor de carbono no endurecimento em aços.	32
Gráfico 3 - Curvas de dureza para um aço SAE 1090 (0,89% C), em uma série de barras redondas resfriadas em água.....	33
Gráfico 4 - Distribuição típica de dureza em uma barra Jominy.	35
Gráfico 5 - Diagrama de equilíbrio Ferro – Carbono.	40
Gráfico 6 - Diagrama TTT do aço SAE 4140. C=0,37%, Mn=0,77%. Cr=0,98%, Mo=0,21%. Austenitizado a 843°C.....	41
Gráfico 7 - Diagrama TRC do aço SAE 4140. C=0,37%, Mn=0,77%. Cr=0,98%, Mo=0,21%. Austenitizado a 843°C.....	42
Gráfico 8 - Dureza da martensita e perlita fina como função da porcentagem em peso de carbono.	48
Gráfico 9 - Diagrama TTT para aço SAE 4140.....	53
Gráfico 10 - Diagrama CCT (continuous cooling transformation) do aço SAE 1045.	53
Gráfico 11 - Medição tempo x temperatura, através de sensores do aço SAE1045.	61
Gráfico 12 - Medição tempo x temperatura, através de sensores do aço SAE4140.	62
Gráfico 13 - Media de dureza dos aços ensaiados e o desvio padrão medido.	65
Gráfico 14 - Perfil de dureza após ensaio Jominy para o aço ABNT 1045.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos aços carbono e aço liga.....	21
Tabela 2 - Composição dos elementos químicos para o SAE 1045 conforme norma ASTM A958.....	22
Tabela 3 - Propriedades Mecânicas do aço ABNT 1045.....	23
Tabela 4 - Composição dos elementos químicos para o SAE 4140 conforme norma ASTM A958.....	23
Tabela 5 - Propriedades mecânicas do aço AISI 4140.	24
Tabela 6 - Propriedade mecânica do aço SAE 4140.....	39
Tabela 7 - Análise química onde a) SAE-1045 e b) SAE-4140.	59
Tabela 8 - Medição do tempo e taxa de resfriamento da decomposição total da austenita, aço SAE 1045.....	61
Tabela 9 - Medição do tempo e taxa de resfriamento da decomposição total da austenita, aço SAE 4140.....	63
Tabela 10 - Medições de dureza SAE 1045 em Rockwell C.	63
Tabela 11 - Medições de dureza SAE 4140 em Rockwell C.	64
Tabela 12 - Dureza média dos corpos de prova SAE-4140 e SAE-1045, após ensaio Jominy em Rockwell C.	65

LISTA DE ABREVIATURAS

A – Austenita

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Af – Austenita Final

AISI – American Iron and Steel Institute

As – Austenita Inicial

ASTM – American Society for Testing and Materials

C – Cementita

CCC – Estrutura Cúbica de Corpo Centrado

CCT – Continuous Cooling Transformation

F – Ferrita

Gpa – Gigapascal

HB – Brinell

ITT – Isothermal Time Transformation

J – Joule

Kg/m³ – Quilograma por Metro Cúbico

M50 – Martensita 50%

M90 – Martensita 90%

Mpa – Megapascal

Ms – Martensita Inicial

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

SAE – Society of Automotive Engineers

TCC – Estrutura Tetragonal de Corpo Centrado

TRC – Transformação em Resfriamento Contínuo

TTT – Curva Temperatura, Tempo e Transformação

ZAC – Zona Afetada pelo Calor

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	18
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3 JUSTIFICATIVA	19
4 REVISÃO DE LITERATURA	20
4.1 AÇOS	20
4.1.1 ESTRUTURA E CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS	21
4.2 SAE 1045	22
4.3 SAE 4140	23
4.3.1 EFEITO DE CADA ELEMENTO DE LIGA	25
4.3.1.1 <i>Carbono</i>	25
4.3.1.2 <i>Manganês</i>	25
4.3.1.3 <i>Silício</i>	26
4.3.1.4 <i>Cromo</i>	27
4.3.1.5 <i>Molibdênio</i>	27
4.3.1.6 <i>Enxofre</i>	28
4.3.1.7 <i>Fósforo</i>	29
4.4 TRATAMENTO TÉRMICO E TEMPERABILIDADE	29
4.4.1 DETERMINAÇÃO DA TEMPERABILIDADE	32
4.4.1.1 <i>Ensaio de temperabilidade Grossmann</i>	32
4.4.1.2 <i>Ensaio de Temperabilidade Jominy</i>	33
4.4.1.2.1 Vantagens e desvantagens do ensaio Jominy	34
4.4.1.2.2 Curvas de temperabilidade	35
4.5 MEIOS DE RESFRIAMENTO E SEVERIDADE DE TÊMPERA	35
4.6 FATORES QUE INFLUENCIAM OS TRATAMENTOS TÉRMICOS	37
4.7 TRATAMENTO DE TÊMPERA E REVENIMENTO	38
4.8 DIAGRAMA DE EQUILÍBRIO Fe-C	40
4.9 MICROCONSTITUINTES DO AÇO	44
4.9.1 A PERLITA	44
4.9.2 A BAINITA	45
4.9.3 A MARTENSITA	46
4.9.3.1 <i>A Martensita Revenida</i>	48

4.9.4 FERRITA.....	49
5 MATERIAIS E MÉTODOS	51
5.1 ANÁLISE QUÍMICA DOS AÇOS	52
5.2 TRATAMENTO TÉRMICO	52
5.3 ENSAIO JOMINY	54
5.4 IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS	57
5.5 ENSAIO DE DUREZA E METALOGRAFIA.....	57
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
6.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA	59
6.2 ENSAIO JOMINY	59
6.3 ENSAIO DUREZA	63
7 CONCLUSÃO	73
8 PESQUISAS FUTURAS	74
REFERÊNCIAS.....	75

1 INTRODUÇÃO

Com o grande número de engrenagens fundidas utilizadas nos segmentos industriais do Brasil tornou-se essencial um estudo dos tipos de materiais e processamentos para aplicação dessas peças.

Esse processo de fabricação leva em consideração uma das técnicas mais utilizadas para a fabricação de engrenagens, que é a fundição em areia. Neste processo os moldes são confeccionados com uma mistura de areia e aglomerante (PERINI,1980).

O aço é o principal material utilizado na fabricação de engrenagens e é necessário o investimento em pesquisas e técnicas de processamento desse material. Dentre as várias classes de aços existentes destaca-se na fabricação de engrenagens o SAE-1045 e o SAE-4140, ambos são considerados aços que possibilitam a tempera.

As ligas ferrosas podem englobar uma serie de propriedades mecânicas que influenciam diretamente nas aplicações dos aços promovendo um melhor desempenho destes, ou não, o que justifica a preocupação dos engenheiros e técnicos no momento de sua seleção, influenciando as propriedades mecânicas da engrenagem.

Na escolha do tipo de aço para fabricação de engrenagens através do processo de fundição leva-se em consideração o custo de fabricação. Porém em contrapartida, se faz necessário analisar a durabilidade da engrenagem ao se escolher um tipo de aço no seu projeto.

Este estudo analisará os dois tipos de aços, comumente usados para fabricação de engrenagem, comparando suas propriedades mecânicas afim de analisar a viabilidade de substituir uma engrenagem fabricada em SAE-1045 por uma em SAE-4140, utilizando a microestrutura como parâmetro de escolha de material. É importante destacar que neste trabalho será utilizado a nomenclatura SAE ao invés de SC. Trata-se na norma ASTM A-958 para materiais fundidos o termo SC. Entretanto, a composição química do SAE 1045 e do SC 1045 é similar, mesmo para o SAE 4140 e para o SC 4140.

Torna-se necessário levar em consideração que os dois aços escolhidos para o estudo são capazes de atingir os valores mínimos de propriedades mecânicas que a engrenagem fundida necessita para operação. Assim, o aço deve ter compatibilidade total com a norma ASTM A-148 Grau 90/60 que determina essas

propriedades mecânicas necessárias e a norma ASTM A-958, que faz uma relação entre composição química, propriedades mecânicas e tratamento térmico.

De modo geral a compreensão das microestruturas dos aços se torna extremamente importante para gerar esse desenvolvimento comparativo do SAE-1045 e SAE-4140.

Apresentar os efeitos dos elementos de liga que se destacarão no processo de temperabilidade do SAE-4140, isso será um fator decisivo para a análise da durabilidade da engrenagem, devido ao tratamento térmico ser um processo capaz de alterar a resistência mecânica do material sem modificar a composição química, tendo influência direta da temperabilidade.

Os materiais tratados termicamente possuem propriedades mecânicas superiores em comparação aos materiais não tratados, fazendo com que possam ser utilizados em situações que exigem dos metais, propriedades mecânicas melhoradas, como no caso de engrenagens, eixos e virabrequins, sem a necessidade de troca do material de fabricação das peças. Por esse motivo que, com o decorrer do tempo, o aço se tornou cada vez mais essencial na fabricação de equipamentos e peças. Ao longo do tempo, os estudos na área do tratamento térmico foram sendo aprimoradas e os efeitos sobre os materiais conhecidos.

Segundo Bordini (BORDINI, 1975), o tratamento térmico dos aços consiste em aquecer e resfriar as suas ligas, em condições especiais, a fim de melhorar suas propriedades mecânicas e características físicas.

A característica polimórfica do ferro é um fator importante, pois essa característica possibilita ao material o aprimoramento de suas propriedades mecânicas com a aplicação de um tratamento térmico, permitindo que a liga ferrosa seja utilizada nas mais variadas condições de serviço, como exemplo, na indústria química, na têxtil, na mecânica, etc.

Um tratamento térmico que é utilizado para a maioria dos materiais é a têmpera (SMITH *et al.*, 1991), no qual determinado aço é aquecido até a sua temperatura de austenitização e depois resfriado rapidamente fazendo com que a dureza do material aumente, alterando a microestrutura do aço para martensita, desejada nesse processo.

O Ensaio de Jominy é um ensaio realizado para avaliar a temperabilidade de um material, sendo ele prático e com custo relativamente baixo de execução. Atualmente, é o método mais utilizado quando se quer ter conhecimento da

temperabilidade de determinado aço. Ele é padronizado internacionalmente pelas normas da ASTM, e no Brasil pela ABNT e consiste em utilizar corpos de prova de determinado tamanho e diâmetro, aquecendo até a temperatura de austenitização e logo após resfriado com um jato d'água em uma extremidade do corpo de provas. Após o ensaio, é medida a dureza do material ao longo do seu comprimento (NUNURA, 2009; XAVIER et al., 2009).

O processo de têmpera, em geral, é rápido (exceto para alguns aços-liga que podem ser temperados ao ar). Por essa razão, o material trabalhado deve estar austenitizado homogêneo para então ser resfriados. Existem vários exemplos de meios que se podem utilizar, cada um remove o calor da peça de forma diferenciada. Dependendo da temperatura no início do resfriamento e de suas características, em geral são utilizados óleos como meio de resfriamento para se obter têmperas mais moderadas, evitando trincas, tensões internas elevadas e empenamento das peças tratadas termicamente (CASTRO, 2007).

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é analisar a viabilidade técnica na substituição do aço fundido SAE-1045 para o SAE-4140 aplicado em engrenagem fabricados pelo processo de fundição, através da análise da temperabilidade.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos, podem-se citar:

- ✓ Analisar a influência dos elementos de liga na temperabilidade do aço SAE-4140.
- ✓ Compreender as transformações microestruturais sofridas por ambos os aços no processo de têmpera.
- ✓ Avaliar a dureza em ambos para aplicação em engrenagens fundidas.
- ✓ Avaliar a temperabilidade dos aços utilizados.
- ✓ Avaliar a taxa de resfriamento do SAE 1045 e SAE 4140.

3 JUSTIFICATIVA

As engrenagens são peças importantes nas indústrias de todos os segmentos desde grandes montadoras até pequenas máquinas do agronegócio. O estudo de suas propriedades mecânicas é de alta relevância para conseguir melhores resultados, assim aumentando a viabilidade da peça na operação. Os elementos de liga nessas peças contribuirão para o aumento de sua vida útil devido ao seu aumento de resistência mecânica.

Para a fabricação de engrenagens de maiores diâmetros se faz necessário utilizar o processo de fundição.

Diferentemente de todos os processos de fabricação, a fundição possui características específicas que possibilitam alterar a microestrutura do material, mesmo que tenham a mesma composição química. Neste caso, é necessário um tratamento térmico para aumentar a resistência mecânica dos dentes das engrenagens.

O aço SAE 1045, trata-se de um aço carbono onde é formado predominantemente por ferro e carbono, já o SAE 4140 é um aço de baixa liga contendo elementos que potencializam as propriedades mecânicas e favorecem na temperabilidade do metal, como o molibdênio e cromo. Assim, assim estima-se a substituição da engrenagem de SAE 1045 pela de SAE 4140 e avaliadas as propriedades mecânicas através da dureza e microestrutura.

4 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo serão abordadas considerações sobre os materiais estudados e os processos que os mesmos passarão.

4.1 AÇOS

O aço é o material mais versátil entre as ligas metálicas, e é produzido em grande variedade de tipos e formas, para atender eficazmente a determinadas aplicações. Esta variedade decorre da necessidade de ininterruptas adequações dos produtos, às exigências do mercado que pede aplicações específicas, sejam elas nas mudanças das propriedades mecânicas, na composição química, ou até mesmo na forma final do material (CENTRO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO EM AÇO, 2014).

Na década de 1950, as ligas metálicas tratadas termicamente evoluíram dos aços-carbono, pois estes apresentavam baixa resistência mecânica e baixa soldabilidade. Este desenvolvimento foi impulsionado no final da década de 1960, por imposição de programas aeroespaciais, principalmente os de caráter militar, com intuito de obter materiais mecanicamente mais resistentes. Essa evolução ocorreu partindo inicialmente das ligas ferro/carbono, passando por uma sequência de combinações até alcançar as ligas de composição com porcentagem muito baixa de teor de carbono e altos teores de elementos de ligas, tais como níquel, cromo, cobre, molibdênio, silício, dentre outros (CARDOSO, 2011)

A introdução de ligas nos aços para a construção mecânica é feita com finalidade de aumentar a profundidade de endurecimento por têmpera e a resistência mecânica, além de conferir uniformidade na resistência em peças de dimensões maiores e aumentar a resistência ao desgaste (ECHEVERRI, 2012).

Por definição, aço é a liga ferro-carbono contendo geralmente de 0,008% até aproximadamente 2,0% de carbono, além de certos elementos residuais, resultantes dos processos de fabricação, ou adicionados propositalmente. A introdução de outros elementos de liga nos aços carbono é feita quando se deseja um dos seguintes efeitos:

- Aumentar a dureza e resistência mecânica.

- Conferir resistência uniforme através de toda a secção em peças de grandes dimensões.
- Diminuir o peso (como consequência do aumento da resistência).
- Conferir resistência à corrosão, aumentar resistência ao calor.
- Aumentar a resistência ao desgaste.
- Aumentar a capacidade de corte e melhorar as propriedades elétricas e magnéticas (CHIAVERINI, 2005).

4.1.1 ESTRUTURA E CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS

Existem sistemas de classificação para aços devido à grande quantidade de ligas existentes. A classificação mais generalizada e as mais usadas são os da AISI (American Iron and Steel Institute) e da SAE (Society of Automotive Engineers). Quatro números são utilizados para designar os aços, os dois primeiros indicam o tipo e o teor aproximado de elementos de liga e os outros dois últimos especificam o teor de carbono. A engenharia e a indústria brasileira também dispõem de um sistema de classificação de aços para construção mecânica, elaborado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, (ABNT), baseado nos sistemas americanos SAE e AISI (CHIAVERINI, 2005), mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação dos aços carbono e aço liga.

TIPO	SAE
Aços - Carbono	1XXX
Simples (Mn, 1,00% máximo)	10XX
Ressulfurado	11XX
Ressulfurado e Refosforado	12XX
Com adição de Nb	14XX
Simples (Mn, 1,50% máximo)	15XX
Aços - Manganês	13XX
Aços - Níquel	2XXX
Aços - Níquel - Cromo	3XXX
Aços com Molibdênio	4XXX
Aços - Cromo	5XXX
Aços - Cromo - Vanádio	6XXX
Aços - Tugstênio - Cromo	7XXX
Aços - Níquel - Cromo - Molibdênio	8XXX

Aços - Silício - Manganês	92XX
Aços - Níquel - Cromo - Molibdênio	93XX, 94XX, 97XX, 98XX
Aços com Boro	XXBXX
Aços com Chumbo	XXLXX

Fonte: Souza (2012).

Os aços de baixo carbono possuem um máximo de 0,3% deste elemento, que induz ductilidade, bons para o trabalho mecânico e soldagem. São utilizados na construção de edifícios, pontes, navios, automóveis, dentre outras aplicações. Os aços de médio carbono possuem de 0,3% a 0,6% de carbono e são utilizados em engrenagens, bielas e outros componentes mecânicos. Quando temperados e revenidos, atingem boa tenacidade e resistência. Aços de alto carbono possuem mais que 0,6% de carbono, elevada dureza e resistência após têmpera, e são comumente utilizados em trilhos, molas, engrenagens, componentes agrícolas sujeitos ao desgaste, pequenas ferramentas, etc (PANNONI, 2001).

4.2 SAE 1045

Pode-se considerar que “o aço SAE-1045 segundo a NBR 172/2000 (Tabela 2) é classificado como aço para construção mecânica, ao carbono e especial. Esta última consideração deve-se às exigências de ensaio de impacto no estado temperado e revenido” (OLIVEIRA; DENTI 2007, p. 10).

Tabela 2 - Composição dos elementos químicos para o SAE 1045 conforme norma ASTM A958.

%C	%Mn	%P	%S	%Si
0,43 – 0,50	0,50-0,90	0,04	0,04	0,30 - 0,60

Fonte: American Society for Testing Materials (2000).

Os aços de construção ao carbono quase sempre são utilizados no estado de fornecimento sem qualquer tratamento térmico. Com a intenção de se obter melhores características para a peça, no entanto, recorre-se a tratamentos térmicos convencionais, podendo ser normalização, recozimento, têmpera e revenimento (TRINDADE et al., 2017, p. 70).

O aço ABNT 1045 é utilizado, dentre outras aplicações, em eixos de bombas das torres de destilação e em eixos de ventiladores nas refinarias do setor de petróleo

e gás, geralmente sofrendo desgaste devido ao ambiente agressivo ao qual são expostos.

A Tabela 3 mostra as características mecânicas do aço SAE 1045 em diferentes temperaturas de revenimento.

Tabela 3 - Propriedades Mecânicas do aço ABNT 1045.

Temperatura de Revenido °C	Limite de resistência a tração (Mpa)	Alongamento em 50mm (%)	Estricção (%)	Dureza Brinell (HB)
205	1132	09	33	363
260	1111	11	35	352
315	1070	09	39	341
370	1029	15	43	331
425	967	08	47	311
480	906	18	50	293
540	823	20	52	277
595	768	22	55	255
650	720	24	57	241

Fonte: Metals Handbook (1991).

Conforme Tabela 3 a temperatura de revenimento interfere diretamente nas propriedades mecânicas finais dos aços SAE 1045, quanto menor for a temperatura de revenimento maior será a resistência a tração e dureza, porém o alongamento diminuirá.

4.3 SAE 4140

A norma ASTM A958 SAE 4140 apresenta a seguinte composição química na Tabela 4:

Tabela 4 - Composição dos elementos químicos para o SAE 4140 conforme norma ASTM A958.

%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Cr	%Mo
0,38 - 0,43	0,70 - 1,10	0,035	0,04	0,30 - 0,60	0,80 - 1,10	0,15 - 0,25

Fonte: American Society for Testing Materials (2000).

Os aços SAE 4140 possuem grande empregabilidade em aplicações na indústria. Os aços 41xx são ligados ao Cromo ($\approx 1\%$) e ao Molibdênio ($\approx 0,2\%$), que alcançam alta resistência por meio dos tratamentos térmicos de têmpera e revenido.

Através dos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, pode-se obter equipamentos que requerem tensão limite de escoamento entre 410 MPa e 965 MPa, alcançando um limite de resistência à tração de até 1650 MPa. Os principais aços da família 41xx são AISI/SAE 4130, 4140 e 4145, sendo os dois últimos os de maior aplicação na indústria metalmeccânica (ASM HANDBOOK, 1990).

O aço da série 4140, também conhecido como aço-cromo-molibdênio é classificado como aço médio carbono ligado para beneficiamento. Este assume teores de carbono entre 0,3% e 0,5% em sua estrutura, explicando a classificação de ser considerado um aço de médio carbono. Chegam a temperaturas de até 480°C, porém, valores acima disso reduzem a resistência do material rapidamente (ROCHA, 2004). A Tabela 5 mostra as propriedades mecânicas do aço SAE 4140.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas do aço SAE 4140.

Propriedades	Condições		
		T(°C)	Tratamento
Densidade (10^3kg/m^3)	7,7- 8,03	25	
Coefficiente de Poisson	0,27- 0,3	25	
Módulo de Young (Gpa)	190 – 210	25	
Resistência à tensão (Mpa)	655		
Tensão de escoamento (Mpa)	417,1	25	Normalizado a 870°C
Alongamento %	18		
Redução de área %	56,9		
Dureza (HB)	210	25	Normalizado a 870°C
Resistência a Impacto (J)	54,5	25	Normalizado a 870°C

Fonte: Rocha (2004).

O aço SAE 4140 é empregado em peças que exigem elevada dureza, resistência e tenacidade, sendo de uso recorrente na fabricação de automóveis,

aviões, virabrequins, bielas, eixos, engrenagens, armas, parafusos, equipamentos para petróleo, dentre outros (ROCHA, 2004).

Apresenta propriedades tais como elevada resistência à tração, dureza elevada pelos teores de cromo e molibdênio, boa ductilidade e resistência ao choque. É extensamente utilizado na fabricação de peças para equipamentos de perfuração e elementos de máquinas, como por exemplo: virabrequins, bielas, braços, eixos, engrenagens, parafusos de alta resistência, entre outros (COLPAERT, 2008; SILVA; MEI, 2006; SPEER, 2005).

Os aços ligados possuem elementos de liga em sua composição para auxiliar em suas propriedades e características, tais como, para aumentar a dureza e a resistência à tração; deslocar as curvas transformação, temperatura e tempo (TTT) para a direita; ou conferir propriedades especiais, como por exemplo: resistência à corrosão, estabilidade a altas e baixas temperaturas, controle de tamanho de grão, melhora da conformabilidade, melhora das propriedades elétricas e magnéticas e diminuição de peso (SILVA; MEI, 2006; SPEER, 2005).

4.3.1 EFEITO DE CADA ELEMENTO DE LIGA

4.3.1.1 *Carbono*

O carbono é o elemento que tem maior efeito na temperabilidade, especialmente quando está na presença de elementos de liga, a fim de atingir máxima dureza. Entretanto, quanto maior for o teor de carbono, mais se aumenta a fragilidade do material. Além disso, com a dureza maior, aumenta-se também a resistência ao desgaste e, por isso, a usinabilidade e o trabalho mecânico a frio se tornam mais difíceis (SOUZA, 2012).

O carbono é um elemento que normalmente ocupa posições intersticiais, cujo teor modifica diversas propriedades do aço. Quanto maior o teor de carbono, maior é a resistência à tração, a temperabilidade e a dureza; e menor é a ductilidade, a soldabilidade e a tenacidade a fratura do aço (FREITAS, 2010).

4.3.1.2 *Manganês*

A função principal do manganês é combinar-se com o enxofre, formando o sulfeto de manganês (MnS), impedindo que se forme o sulfeto de ferro (FeS), que fragiliza o aço, principalmente a temperaturas mais altas. O sulfeto de manganês não contribui para a fragilização. Os teores de manganês sempre encontrados nos aços (0,5% Mn) já são suficientes para essa finalidade, de combinar-se com o enxofre e impedir que o mesmo forme sulfeto de ferro. O manganês não é comumente usado para desoxidar o aço, pois, para isso, existem outros elementos mais eficazes (SOUZA, 2012).

O manganês, quando em teores mais altos, tem também a capacidade de refinar o grão da perlita nos aços de baixo carbono pela diminuição da temperatura de transformação da austenita, aumentando a tenacidade do aço-carbono (SOUZA, 2012).

O manganês, presente no SAE 4140, tem efeito dessulfurante e desoxidante, aumenta a resistência à tração quando sua porcentagem é acima de 1% e diminui a temperatura de transformação da martensita (SILVA; MEI, 2006).

4.3.1.3 Silício

O silício promove a grafitação, porém esse efeito só é significativo quando em teores acima de 2%, pois ele tende a decompor a cementita (Fe_3C) em carbono livre. Além disso, o silício diminui o campo da fase ferro gama até um teor de 2% e com 3,3% desaparece por completo a fase gama, pois o silício é estabilizador da ferrita.

Tendo a propriedade de grafitar, ele faz diminuir a solubilidade do carbono no ferro, ficando rejeitado como grafita, o que é indesejável à resistência mecânica e à ductilidade do aço. (SOUZA, 2012).

Para o aquecimento até a região austenítica, o aumento de teor de silício exige temperaturas mais altas de austenitização. O silício tem moderada eficácia na temperabilidade do aço que tenha elementos não-grafitizantes. No revenimento, o silício em teores de 0,3%, que é acima dos teores comuns em aço carbono, produz o aumento de dureza do aço revenido devido ao aumento de resistência da ferrita causado pelo silício dissolvido, quando a ferrita contém partículas de carboneto. Sendo estabilizador da ferrita, o silício, quando em teores altos, sempre provoca o aparecimento de alguma ferrita no aço revenido (SOUZA, 2012).

O silício melhora a resistência à tração com pouca perda de ductilidade, melhora a resistência à oxidação, age como desoxidante e aumenta o tamanho de grão (SILVA; MEI, 2006).

4.3.1.4 Cromo

O cromo é um elemento que forma carbonetos estáveis e muito duros nos aços. Ele tem maior tendência a formação de carboneto que o manganês (SOUZA, 2012). O cromo é adicionado nos aços de baixa e alta resistência em teores que variam de cerca de 1% a 1,10%. (SOUZA, 2012).

Com médios e altos teores de carbono, o cromo aumenta o tempo necessário para a transformação isotérmica da austenita em perlita em temperatura acima de 540°C e em bainita em temperaturas mais baixas. Além disso, com teores de cromo acima de 2% e 3%, ocorre a supressão da formação de perlita com teores baixos e médios de carbono, ocasionando a formação da bainita no resfriamento contínuo (SOUZA, 2012).

Quando se tem aços de médio carbono normalizados, cerca de 2% a 3% Cr fazem a perlita ficar mais fina durante o resfriamento, aumentando a resistência mecânica do aço. Com teores de cromo ainda mais altos, a perlita se torna um produto lamelar que contém ferrita, cementita e carboneto de cromo (Cr_7C_3) (SOUZA, 2012).

Os carbonetos de cromo, sendo muito duros, conferem aos aços grande resistência ao desgaste e grande capacidade de corte. Esses carbonetos de cromo são de difícil dissolução na austenita (SOUZA, 2012).

O cromo aumenta a resistência à corrosão, ao calor e ao desgaste, devido à formação de carbonetos de cromo. Para a adição de 1% de Cr, a resistência à tração aumenta em média 78 a 98 MPa. Este elemento também aumenta a temperabilidade do aço e diminui a resistência ao impacto, a tenacidade a fratura e a soldabilidade (FREITAS, 2010; SILVA; MEI, 2006).

4.3.1.5 Molibdênio

O molibdênio é formador de carboneto, podendo ficar dissolvido no carboneto de ferro ou formando um carboneto complexo (Fe-Mo-C). No entanto, o molibdênio também fica em solução sólida na ferrita. Ele é um elemento de liga que aumenta

fortemente a temperabilidade do aço. Não é eficiente para refinar o grão da austenita (SOUZA, 2012).

Nos aços de meio e alto carbono já se formam carbonetos que retardam a velocidade de nucleação e crescimento da perlita. Esses carbonetos melhoram o espaçamento interlamelar da perlita. Com cerca de 0,75% Mo, a estrutura fica consideravelmente modificada, formando-se estruturas parcialmente bainíticas em altas temperaturas. Quanto maior for o teor de molibdênio, mais se formará a bainita, o que não acontece com os aços-carbono. Devido ao longo do tempo para se completar a transformação a altas temperaturas, ocorre também a esferoidização da bainita (SOUZA, 2012).

O molibdênio, quando adicionado em teores menores que 0,3%, como é o caso no aço SAE 4140, aumenta a dureza e a resistência mecânica. Este elemento forma carbonetos que atuam como refinador de grão, melhorando a resistência à corrosão, formando partículas resistentes à abrasão e contrabalança a tendência à fragilidade de revenido (FREITAS, 2010; SILVA; MEI, 2006).

O molibdênio é o elemento de liga mais efetivo para aumentar a resistência e a dureza do aço a altas temperaturas. Juntamente com o cromo, ele também é útil para diminuir o ataque do aço pelo hidrogênio a temperaturas elevadas, bloqueando a reação devido ao carboneto de molibdênio e de cromo. Ele também aumenta a resistência à corrosão do aço pelo ácido clorídrico (SOUZA, 2012).

4.3.1.6 Enxofre

O enxofre está sempre presente nos aços como elemento residual em baixos teores. Ele é considerado elemento prejudicial as propriedades a frio e a quente, ou seja, baixa resistência ao impacto, baixa ductilidade e baixa resistência à fadiga, pela formação do sulfeto de ferro, que se localiza nos contornos de grãos da ferrita e da perlita (SOUZA, 2012).

A dessulfuração pode ser também feita por meio de cálcio e dos metais constituintes do grupo dos terras-raras, que são também desoxidantes.(SOUZA, 2012).

O enxofre é um elemento fragilizante, porém é interessante em aços que possuem manganês, pois estes elementos se combinam, formando sulfeto de manganês, que melhora a usinabilidade (SILVA; MEI; 2006).

4.3.1.7 Fósforo

O fósforo não é considerado um elemento de liga, embora esteja sempre presente nos aços como elemento residual. Ele é estabilizador da ferrita, endurecendo-a por entrar em solução nela em aços baixo carbono. Com isso, ele fragiliza o material (SOUZA, 2012).

O fósforo aumenta fracamente a temperabilidade da austenita além de aumentar a possibilidade de fragilidade ao revenido. A fragilização que o fosforo apresenta é a razão principal de mantê-lo em teores residuais nos aços, pois com teores mais altos a fragilidade fica acentuada pela formação excessiva de fosfeto de ferro. Admite-se fosforo mais alto quando o aço precisa ter maior usinabilidade (SOUZA, 2012).

4.4 TRATAMENTO TÉRMICO E TEMPERABILIDADE

O tratamento térmico é um conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os metais, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidades de aquecimento e de resfriamento, com o objetivo de alterar as suas propriedades conforme exigências da utilização do material. Eles podem tomar várias formas e denominações, mas a diferença entre si estará ligada ao nível de temperatura em que se dá o aquecimento, ao tempo que permanece a peça aquela temperatura, e a forma através da qual se dá o resfriamento (CHIAVERINI, 2005; RAUTER, 1974).

As alterações observadas em um material, em decorrência de um tratamento térmico, estão associadas a fenômenos microestruturais, tais como: recuperação, recristalização, transformações de fase, formação de precipitados, controle ou refino de grão, entre outros. Portanto, a diversidade de microestruturas que podem ser desenvolvidas através de tratamentos térmicos, em virtude de sua relação com as propriedades, permite a escolha de determinadas combinações, como garantia do desempenho do material em uma determinada aplicação (VAN VLACK, 1994).

A temperabilidade do aço, ou profundidade de penetração à têmpera, é outra característica importante a ser analisada, a qual é influenciada pelo tamanho de grão austenítico e pela homogeneidade da microestrutura inicial (austenítica). Esta

característica está relacionada com a homogeneidade de propriedades mecânicas entre núcleo e superfície de um mesmo componente, após tratamento térmico de têmpera e revenimento; bem como com a capacidade de um aço formar martensita e, a velocidade crítica de têmpera (COLPAERT, 2008; FREITAS, 2010).

O aço SAE 4140 apresenta alto grau de temperabilidade devido ao teor de carbono e manganês presente em sua composição. O carbono influi sobre a dureza da martensita e os demais elementos de liga retardam a decomposição da austenita por difusão, aumentando sua temperabilidade. Por isso, aços com maior teor de elementos de liga deslocam a curva TTT para a direita, pois apresentam menor velocidade para a formação da martensita, possibilitando maior tempo de resfriamento para obter este constituinte (COLPAERT, 2008; LIMA, 2006).

As curvas TTT possibilitam o acompanhamento da formação dos constituintes e são divididas em: a) Isothermal Time Transformation (ITT), que são curvas de transformação isotérmica; e b) Continuous Cooling Transformation (CCT), que são curvas de transformação por resfriamento contínuo, também conhecidas como Transformação em Resfriamento Contínuo (TRC) (SILVA; MEI, 2006).

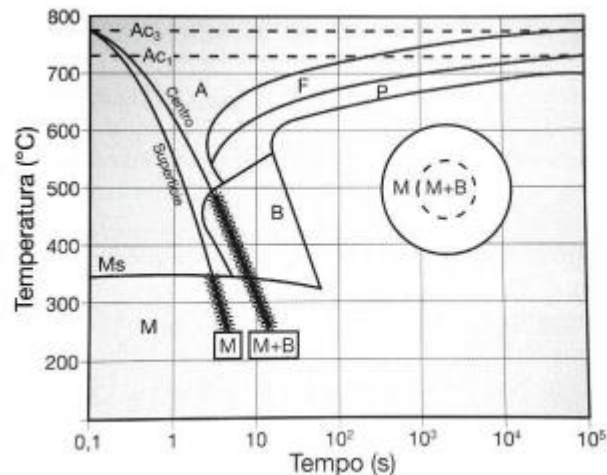
No resfriamento dos metais a partir da temperatura de austenitização, dependendo da velocidade de resfriamento começa a formar microconstituintes diferenciados, influenciado pela velocidade crítica que é a velocidade na qual é formado um único microconstituinte, transformando austenita em martensita. A martensita possui estrutura e propriedades diferentes dos outros constituintes que são formados em temperaturas e velocidade de resfriamento distintas (RASMA, 2015).

No que se refere à temperabilidade dos aços, a composição química do material da peça é a característica que define a variação de dureza desde a superfície até o núcleo da peça quando temperada. A temperabilidade está associada à capacidade de determinado aço formar martensita e, portanto, à velocidade crítica de têmpera. O tamanho de grão e a homogeneidade da microestrutura inicial (austenítica) têm efeito sobre a temperabilidade do aço, enquanto o carbono tem um forte efeito sobre a dureza da martensita. A maior parte dos elementos de liga adicionados ao aço retardam as transformações e decomposições difusional da austenita, aumentando sua temperabilidade. Assim, a velocidade crítica para a formação da martensita é menor em aços que contêm maior teor de elementos de liga (COLPAERT, 2008).

A temperabilidade não é sinônimo de dureza, um aço com uma temperabilidade elevada é aquele que forma martensita, não apenas em sua superfície, mas em um elevado grau também em todo seu interior (CALLISTER JÚNIOR, 2015).

Para exemplificar a temperabilidade de um aço e a sua relação com os microconstituintes formados ao longo da peça, o Gráfico 1 demonstra as curvas de resfriamento ao longo de um aço.

Gráfico 1 - Curvas de resfriamento ao longo de um aço genérico de formato cilíndrico.

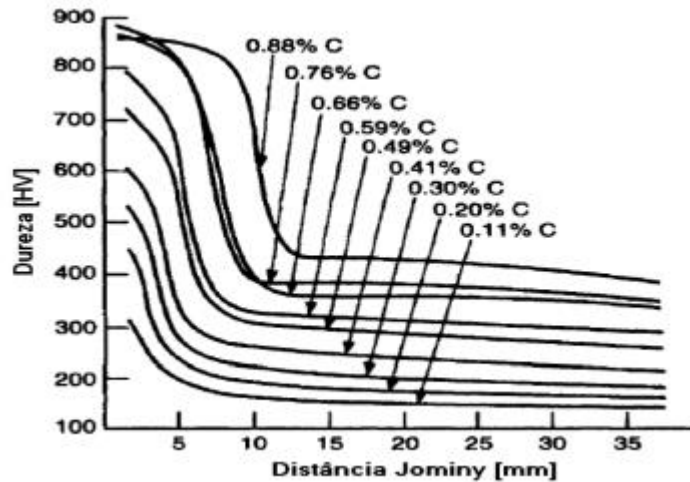


Fonte: Colpaert (2008).

Na superfície, onde a troca de calor é maior e conseqüentemente o tempo para atingir a temperatura Ms é menor, obtém-se somente martensita, já no centro, onde o resfriamento ocorre de forma mais lenta, há formação de porcentagens de martensita e bainita, que por conseqüência fornece características distintas na superfície e no centro da peça. Na superfície há alta dureza devido a formação somente de martensita, no centro há combinação de dureza e ductibilidade, pois a bainita é mais dúctil comparada a martensita, podendo até desprezar a ductibilidade da martensita (COLPAERT, 2008).

De acordo com Llewellyn e Hudd (2004), a dureza de um aço está diretamente ligada com o seu teor de carbono, visto que o carbono influencia na formação da martensita. O Gráfico 2 apresenta os valores de dureza obtidos ao longo de corpos de prova Jominy de diferentes teores de carbono.

Gráfico 2 - Efeito do teor de carbono no endurecimento em aços.



Fonte: Adaptado de Llewellyn, Hudd (2004).

De acordo com o Gráfico 2, com o carbono em maior quantidade aumentará proporcionalmente a dureza e temperabilidade dos aços, assim sua resistência a tração será maior e ductibilidade menor.

4.4.1 DETERMINAÇÃO DA TEMPERABILIDADE

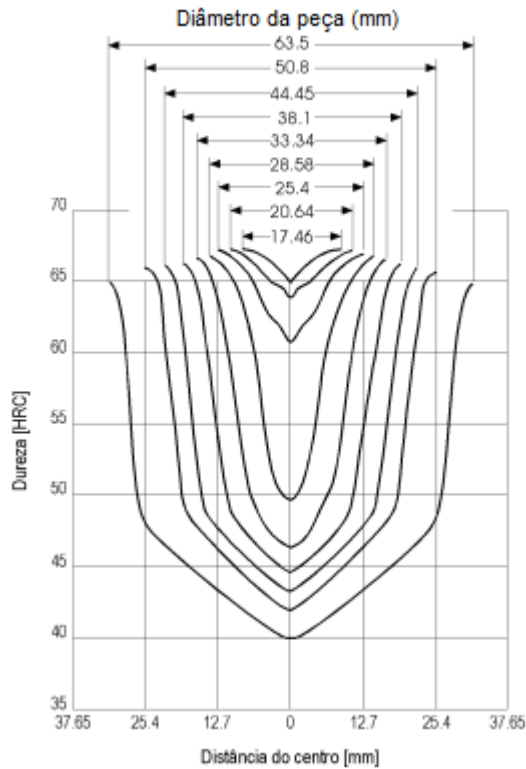
Para determinar a temperabilidade utiliza-se dois métodos Grossmann e Jominy. Dessa forma, há alguns fatores a serem considerados nesse fenômeno, tais como, o teor de carbono, os elementos de liga presentes, os meios de têmpera (taxa de resfriamento), a severidade de têmpera, a geometria da peça e sua transferência de calor (SCHEIDEMANTEL, 2014).

4.4.1.1 Ensaio de temperabilidade Grossmann

Este ensaio, desenvolvido por M. A. Grossmann e seus colaboradores, visa determinar a temperabilidade dos aços, utilizando-se uma série de corpos de prova de diâmetros diferentes que são submetidos a aquecimento de austenitização e posterior resfriamento em meio de têmpera característico para cada composição de liga. Em seguida, estas barras temperadas são cortadas transversalmente e sua dureza é medida da superfície em direção ao centro. Os diagramas gerados a partir deste ensaio são conhecidos como diagramas de penetração de dureza ou diagramas transversais de dureza (AVNER, 1988). O Gráfico 3 apresenta as curvas de dureza

obtidas no ensaio de temperabilidade Grossmann para diferentes diâmetros de barra para um aço SAE 1090.

Gráfico 3 - Curvas de dureza para um aço SAE 1090 (0,89% C), em uma série de barras redondas resfriadas em água.



Fonte: Chiaverini (1984).

O Gráfico 3 demonstra que em um aço carbono, maior valor de dureza na superfície, conforme acontece o aprofundamento de espessura essa dureza diminui gradativamente, ou seja, a ductibilidade no centro da peça é maior que na superfície.

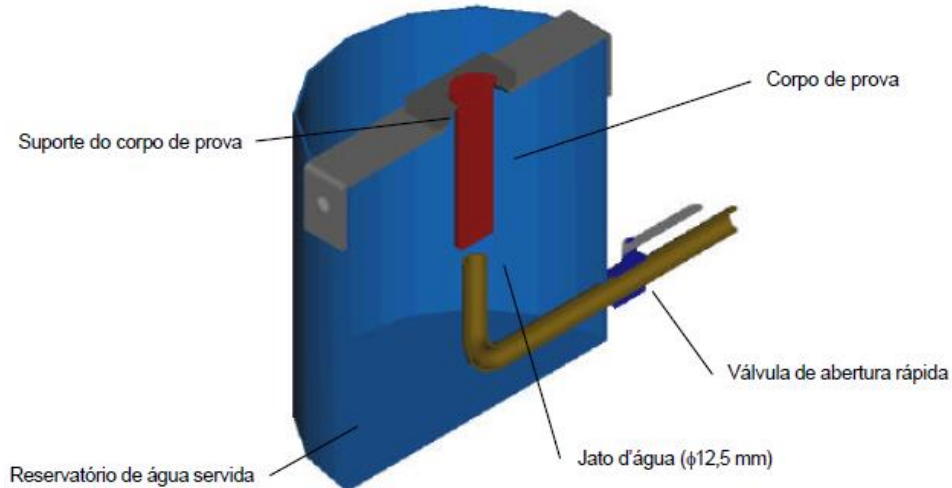
4.4.1.2 Ensaio de Temperabilidade Jominy

Desenvolvido por Walter Jominy e seus colaboradores, é o ensaio mais usado na indústria, pois a partir de um único corpo de prova é possível determinar-se a diminuição do teor de martensita no aço, como função do seu tamanho, levando-se em consideração a ação de diferentes taxas de resfriamento ao longo do seu comprimento (CALLISTER JÚNIOR, 1997).

O ensaio consiste na austenitização, seguido de um resfriamento rápido, de um corpo de prova de dimensões normalizadas (25,5 mm de diâmetro por 101 mm de

comprimento). Como a estrutura inicial tem uma importância muito grande na temperabilidade, o corpo de prova é submetido a um tratamento térmico de normalização antes de ser ensaiado. Na Figura 1 pode-se observar um esquema do aparato utilizado neste ensaio (MARTINS, 2002).

Figura 1 - Desenho esquemático (em corte) do aparato para o ensaio Jominy.



Fonte: Martins (2002).

A Figura 1 trata-se do dispositivo de ensaio de temperabilidade tipo Jominy, normatizado pela norma ASTM A255 (2002), cujo o corpo de prova é austenitizado em um forno e posteriormente resfriado com água com somente uma superfície, assim a taxa de resfriamento vai caindo conforme se afastar da fonte resfriadora.

4.4.1.2.1 Vantagens do ensaio Jominy

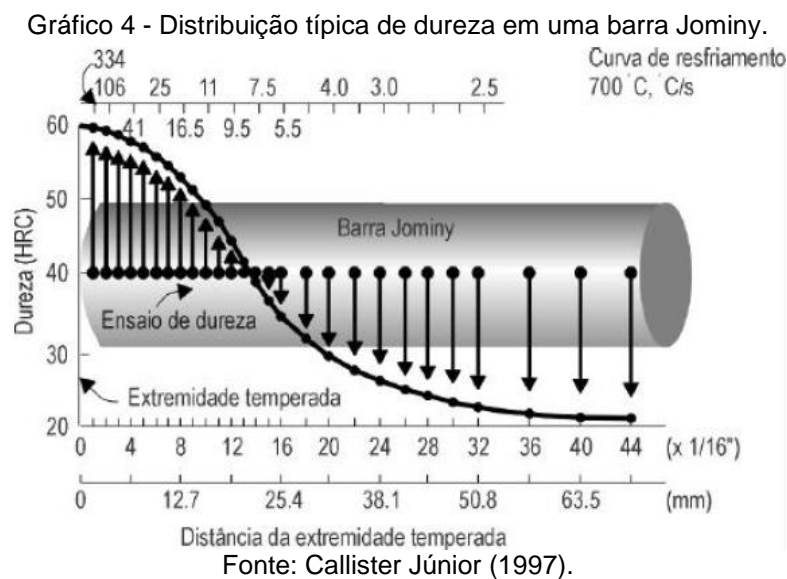
Entre as vantagens que o ensaio Jominy propicia estão:

- Facilidade de realização;
- Baixo custo
- Correlação da dureza final com taxa de resfriamento (MARTINS, 2002).

No ensaio Jominy pode-se entender melhor a microestrutura do aço, bem como suas transformações, possibilitando selecionar melhor o material para uma determinada aplicação (XAVIER et al., 2009).

4.4.1.2.2 Curvas de temperabilidade

Uma curva de temperabilidade Jominy relaciona a dureza na ordenada com o comprimento do corpo de prova na abscissa. Os resultados dessas medições geram uma curva que decresce da posição de 100% de transformação martensítica até obtenção de microestrutura perlítica ou ferrítico-perlítica. Observa-se no Gráfico 4, a correlação entre esta curva e o corpo de prova que lhe deu origem (MARTINS, 2002).



No Gráfico 4, conforme aumentar a distância da extremidade temperada a dureza irá diminuindo, devido a diminuição da taxa de resfriamento.

4.5 MEIOS DE RESFRIAMENTO E SEVERIDADE DE TÊMPERA

Os meios de resfriamento são escolhidos de acordo com as características finais das peças, do tipo de material e das propriedades requeridas. As soluções aquosas com maior agitação são os meios preferidos, pois há troca de calor mais intensa entre o meio e a peça, desde que a peça possua geometria simples, que não provoque excessivo empenamento ou trincas durante a têmpera (DE SOUSA, 2007).

A água possui características desejáveis pois é de baixo custo, não tóxica, possui grande disponibilidade e é não inflamável. Porém, o poder de resfriamento da água decresce rapidamente com o aumento da temperatura. A agitação da água é

uma forma de aumentar a velocidade de resfriamento, pois permite um contato mais direto da água fria com a superfície da peça (DE SOUSA, 2007).

Os óleos convencionais são um dos meios de resfriamento mais brandos que a água ou salmouras, o que diminui o gradiente de temperatura entre a superfície e o centro da peça, e conseqüentemente diminui as chances de ocorrer alguma distorção na peça. Os óleos de resfriamento rápido, são óleos que possuem aditivos para aumentar a taxa de resfriamento, chegando próximo ao resfriamento da água. Os aditivos também melhoram a resistência a oxidação, diminuem a formação de espuma e melhoram as características da curva de resfriamento. Porém, os óleos se degradam conforme seu uso, o que afeta muito sua eficácia em resfriar a peça, ou seja, óleos oxidados com o uso diminuem a taxa de resfriamento das peças durante a têmpera, e também são inflamáveis, pois, a formulação dos aditivos tem como base os derivados do petróleo (DE SOUSA, 2007).

As salmouras são soluções aquosas de cloreto de sódio ou cálcio, combinadas com aditivos. A velocidade de resfriamento dessas soluções é maior que a da água pois, os minúsculos cristais de sal presentes na salmoura que entram em contato com a peça, fragmentam-se violentamente, causando agitação que acaba com o filme de vapor na superfície da peça, o que resulta em velocidades de resfriamento maiores. Devido à alta velocidade de resfriamento a salmoura é recomendada para aços com baixa temperabilidade e de geometria simples. As salmouras possuem desvantagens de serem corrosivas, o que necessita de equipamentos para manuseio e armazenamento. Os sais mais utilizados são concentrações de NaCl 10% e NaOH 3% (DE SOUSA, 2007).

O meio de resfriamento é determinado em função do material e das transformações de fase ou microestruturas desejadas. Este pode ser o próprio ar atmosférico, água, salmoura, óleos sintéticos ou minerais ou até mesmo o próprio forno (FREITAS, 2010).

4.6 FATORES QUE INFLUENCIAM OS TRATAMENTOS TÉRMICOS

Vários fatores influenciam ou determinam os resultados obtidos nas operações envolvidas na execução dos tratamentos térmicos. Dentre estes, a taxa de aquecimento, temperatura final do material, tempo de permanência nesta temperatura (tempo de encharque), velocidade e meio de resfriamento, atmosfera do forno e até mesmo a posição da peça dentro do forno (CALLISTER JÚNIOR, 2006; CHIAVERINI, 2008; REED-HILL, 1982).

A temperatura de final de aquecimento, fator essencial para a ocorrência das mudanças micro-estruturais, geralmente é determinada através da utilização dos diagramas de equilíbrio de cada liga. Esta temperatura, geralmente é maior que a temperatura crítica, porque acima da zona crítica corre a completa dissolução do carboneto de ferro no ferro gama. Essa austenitização é o ponto de partida para algumas transformações posteriores, tais como formação da martensita. Quanto maior a temperatura da peça a ser temperada acima da zona crítica, maior a dissolução das fases, carbonetos e nitretos, porém, maior será o tamanho de grão austenítico, o que pode causar maior fragilização do material após o tratamento (CHIAVERINI, 2005).

O tempo de encharque, período necessário para a peça atingir como um todo a temperatura do forno e para a ocorrência das mudanças desejadas depende, basicamente, da massa e forma do objeto, além de seu estado inicial. A influência desta variável é semelhante à da temperatura de aquecimento. O tempo de encharque possibilita a dissolução das fases e quando em excesso irá promover, o aumento do tamanho de grão, além de possibilitar a oxidação e descarbonetação, no caso dos aços (FREITAS, 2010).

Uma das ferramentas mais importantes para o planejamento e entendimento dos fundamentos dos tratamentos térmicos dos aços são os conhecidos diagramas de equilíbrio das ligas, no caso dos aços, diagramas Fe-Fe₃C, considerado como um guia inicial para o planejamento das operações (KRAUSS, 2000). No entanto, o emprego dos mesmos possui algumas limitações, uma vez que não contemplam a presença de diferentes elementos de liga no material (o que é verificado nos aços comerciais), que possuem o potencial de alterar as características e comportamento das fases e reações observáveis nos diagramas de equilíbrio (que geralmente consideram apenas dois elementos). Alguns tratamentos térmicos, tais como têmpera,

têm por objetivo produzir micro-estruturas fora do equilíbrio (ou metaestável) como a martensita (FREITAS, 2010). Neste contexto outras ferramentas importantes, são os diagramas ou curvas tempo-temperatura-transformação (TTT) e de transformação no resfriamento contínuo (TRC), que exibem as transformações da austenita em função do tempo em temperaturas constantes, e em função de diferentes taxas de resfriamento (KRAUSS, 2000).

4.7 TRATAMENTO DE TÊMPERA E REVENIMENTO

A têmpera é um tratamento térmico caracterizado pelo aquecimento acima da temperatura de austenitização e resfriamento em velocidade superior à velocidade crítica de têmpera, a partir de uma temperatura acima da zona crítica (austenitização) para os aços hipoeutetóides e geralmente dentro da zona crítica, para os aços hipereutetóides, resultando em transformação da austenita em martensita. O revenimento é um tratamento térmico aplicado em peças temperadas ou normalizadas, com a finalidade de provocar um melhor balanço entre a dureza, e reduzir as tensões produzidas durante a têmpera. É caracterizado por um reaquecimento abaixo da zona crítica e resfriamento adequado, visando a ajustar as propriedades mecânicas (TEDESCO, 2007).

O aço SAE 4140 na condição temperada possui pouca aplicação prática, devido à alta dureza e fragilidade da martensita temperada.. Por isso, para adequar a resistência mecânica e a tenacidade do aço após a têmpera, é realiza o tratamento conhecido como revenimento. O revenimento de um aço temperado é o processo no qual o material é aquecido até uma determinada temperatura, abaixo da temperatura crítica, usualmente entre 175 e 705 °C, e mantido durante um intervalo de tempo, para que ocorram transformações na microestrutura e modificações nas propriedades mecânicas de ductilidade e tenacidade à fratura (LIMA, 2006).

Ao se aumentar a temperatura no material é fornecido energia suficiente para que os átomos de carbono se difundam, precipitando como carbonetos e assim aliviando a tensão provenientes da martensita.

A dureza é uma propriedade que sofre redução devido a precipitação dos carbonetos e diminuição da saturação do carbono. Portanto, se o objetivo do revenimento for diminuir a dureza, o indicado é submeter o material a uma temperatura superior por menos tempo (SILVA; MEI, 2006).

A Tabela 6, apresenta diferentes propriedades mecânicas de um aço SAE 4140 temperado em óleo a 850°C e posteriormente revenido com temperaturas diferentes.

Tabela 6 - Propriedade mecânica do aço SAE 4140.

Temperatura de revenimento (°C)	Limite de resistência à tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento em 50 mm (%)	Estricção (%)	Dureza Brinell (HB)	Energia de Impacto Izod (J)
205	1965	1740	11	42	578	15
260	1860	1650	11	44	534	11
315	1720	1570	11.5	46	495	9
370	1590	1460	12.5	48	461	15
425	1450	1340	15	50	429	28
480	1300	1210	16	52	388	46
540	1150	1050	17.5	55	341	65
595	1020	910	19.0	58	311	93
650	900	790	21.0	61	277	112

Obs.: Corpos de prova com 12,7 mm de diâmetro, temperados em óleo a partir de 850 °C.

Fonte: Chiaverini (2005).

Como existe amplas possibilidades de temperatura abaixo da temperatura crítica que podem ser usadas para o revenimento, há uma ampla variação nas propriedades e microestruturas que podem ser produzidas, desde a martensita após têmpera até carbeto esferoidizados na ferrita. Entretanto, é o balanço de dureza (ou resistência) e tenacidade requeridos em serviço que determinam as condições de revenimento para uma dada aplicação (LIMA, 2006).

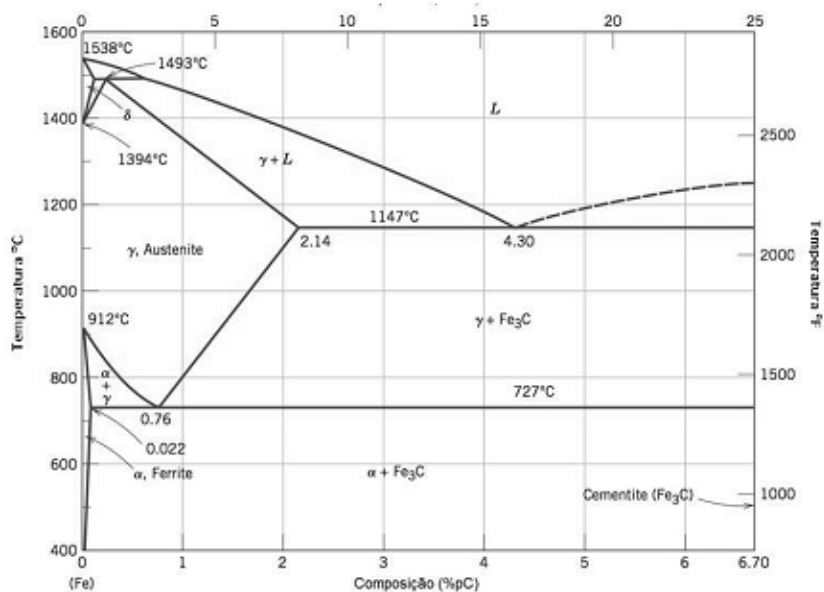
Existem duas faixas de temperatura de revenimento que produzem melhorias significativas na tenacidade à fratura apresentada no estado após têmpera. A primeira é a faixa de 150 a 200°C, cujo revenimento produz um aumento moderado da

tenacidade, que é adequado em aplicações que requerem alta resistência e resistência à fadiga (aços médios carbono), ou onde o carregamento é primariamente compressivo (aços alto carbono). A segunda faixa de temperatura que apresenta resultados significativos no revenimento corresponde aos valores de temperatura acima de 425 °C (HONEYCOMBE; BHADESHIA, 1980; LIMA, 2006).

4.8 DIAGRAMA DE EQUILÍBRIO Fe-C

O diagrama de fases, apresentado no Gráfico 5, mostra a origem no qual todo o tratamento térmico do aço é baseado. Este diagrama define a composição das regiões de temperatura em que várias fases do aço estão estáveis, assim como os limites de equilíbrio entre os campos de fase (KRAUSS, 1994).

Gráfico 5 - Diagrama de equilíbrio Ferro – Carbono.



Fonte: Callister Júnior (2013).

No diagrama do Gráfico 5 são consideradas duas regiões principais, de 0 a 2% de carbono, é a área correspondente aos aços e a acima desse valor, são considerados os ferros fundidos.

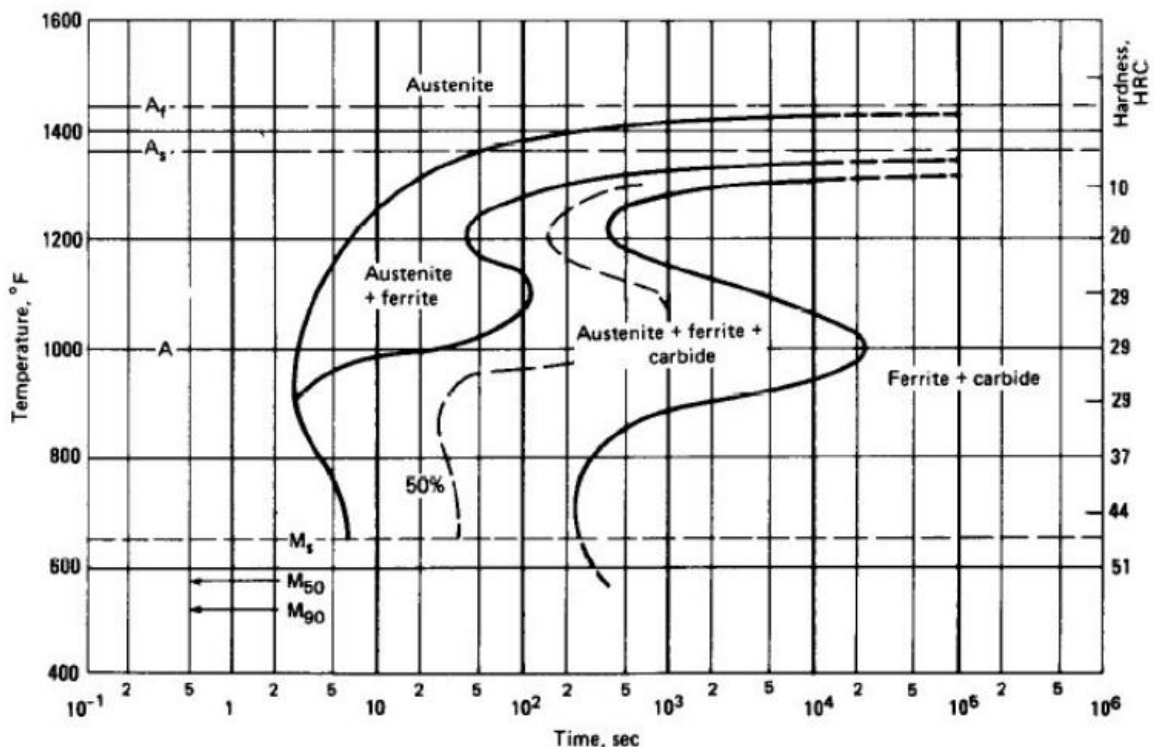
A classificação do diagrama de equilíbrio é baseada no percentual de carbono. As ligas contendo até 0,3% de carbono são considerados aços de baixo carbono, os aços de médio carbono são considerados de 0,3% a 0,6% de carbono e os aços de

alto carbono acima de %0,6 de carbono e os ferros fundidos são ligas contendo acima de 2% de carbono.

No Fe-C a especificação dos microconstituintes é determinado no tratamento térmico, alguns constituintes necessitam de resfriamento mais lento ou moderado para sua formação, não sendo possível observar no diagrama Fe-C. Para o tratamento térmico dos aços os diagramas utilizados e ideais são o diagrama TTT e TRC (RASMA, 2015).

No Gráfico 6 temos ilustrado o diagrama TTT para o aço SAE 4140. O tempo de transformação em uma determinada temperatura é representado pela temperatura isotérmica. Pode-se observar as temperaturas de início da transformação do microconstituente austenita em martensita (M_i) e o final da transformação do mesmo (M_f) (RASMA, 2015).

Gráfico 6 - Diagrama TTT do aço SAE 4140. C=0,37%, Mn=0,77%. Cr=0,98%, Mo=0,21%. Austenitizado a 843°C.



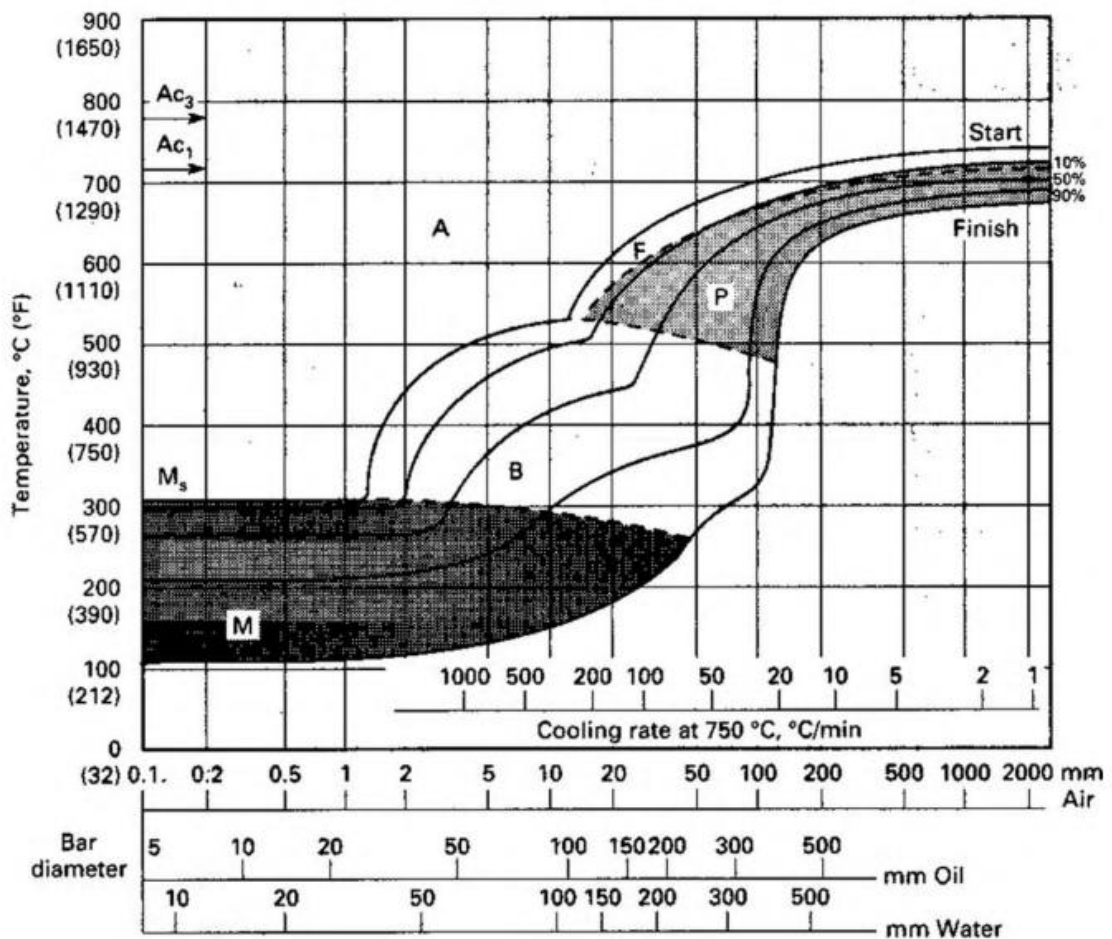
Fonte: Voort (1991).

Consta no Gráfico 6, o diagrama de tempo, temperatura e transformação. Acima dos 723°C, considera-se a estrutura do SAE 4140 austenitizado, demonstrando que o início de suas transformações microestruturais ocorrem no resfriamento de

temperatura, gerando uma curva isotérmica, contado desde o 723°C. Vale salientar que no gráfico a letra “A” representa a austenita, “F” a ferrita e “C” a cementita.

Os diagramas TRC são caracterizados por ser de resfriamento contínuo, mostrando as temperaturas de início e final de transformação em diferentes taxas de resfriamento, conforme indicado no Gráfico 7 (RASMA, 2015).

Gráfico 7 - Diagrama TRC do aço SAE 4140. C=0,37%, Mn=0,77%. Cr=0,98%, Mo=0,21%. Austenitizado a 843°C.

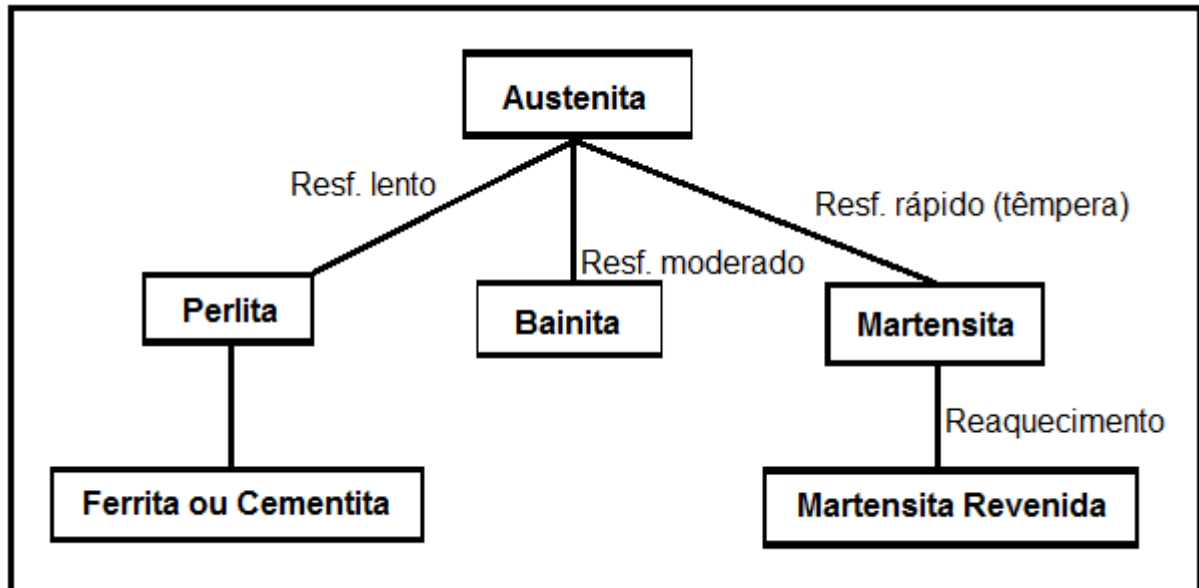


Fonte: Voort (1991).

Consta no Gráfico 7 o diagrama tempo e resfriamento contínuo, acima de 723°C o SAE 4140 está solubilizado em austenita, porém ao ocorrer o resfriamento que diferente do TTT não ocorre de forma isotérmica e sim contínua, os microconstituintes iniciam sua formação a partir da austenita. No gráfico a letra “A” representa a austenita, “F” a ferrita, P a perlita e “B” a bainita.

A Figura 2 demonstra o esquema de resfriamento da austenita para os possíveis microconstituintes conforme a velocidade de resfriamento (CALLISTER JÚNIOR, 2013).

Figura 2 - Transformações possíveis envolvendo a decomposição da austenita.



Fonte: Callister Júnior (2013).

As obtenções desses constituintes são a partir da temperatura de austenitização, onde o material encontra-se totalmente composta da fase austenita e inicia-se o resfriamento e assim o processo de transformação para determinado constituinte.

4.9 MICROCONSTITUINTES DO AÇO

As propriedades físicas e em particular, o comportamento mecânico de um material, dependem da microestrutura.

Microconstituintes são formados no aço, cuja formação depende da composição química e tratamento térmico. Esses microconstituintes incluem perlita, bainita, martensita, martensita revenida e ferrita (CALLISTER JÚNIOR, 2013, p. 252).

4.9.1 A PERLITA

A perlita consiste em camadas alternadas ou lamelas compostas pelas fases ferrita (α) e cementita (Fe_3C). Similar à perlita, a bainita possui microestrutura formada pelas fases ferrita (α) e cementita. A perlita não é uma fase, mas uma mistura de duas fases. No entanto ela é um constituinte, pois tem um aspecto definido ao microscópio

e pode ser claramente identificada em uma estrutura composta de diversos constituintes (BHADESHIA e HONEYCOMBE, 1992; REED-HILL, 1994).

A decomposição da austenita origina a perlita, ocorre por nucleação heterogênea e crescimento. A nucleação pode iniciar com a de ferrita ou cementita na transformação perlítica dependendo se o aço é de composição hipo ou hiper eutetóide (LESSA, 2011).

4.9.2 A BAINITA

A bainita não é uma fase, mas sim uma mistura de ferrita e carbonetos. Na transformação bainítica o carbono que está homogeneamente distribuído na austenita, se concentra em determinados locais formando alto teores de carbono (as partículas de carboneto), originando uma matriz isenta de carbono (a ferrita). A reação bainítica envolve mudanças de composição e implica assim em difusão de carbono (REED-HILL, 1994). As mudanças de composição que ocorrem na transformação bainítica não envolvem elementos de liga substitucionais (THEWLI, 2004).

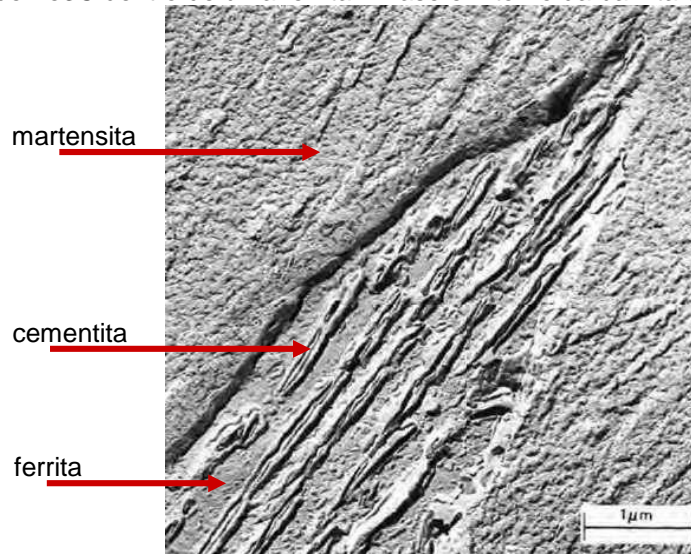
A bainita, diferentemente da perlita (que cresce em lamelas) cresce como plaquetas individuais ou em sub-unidades para formar matrizes paralelas ou feixes (PIRES, 2007; REED-HILL, 1994), onde o crescimento em forma de plaquetas é uma característica típica da martensita. Entretanto, uma diferença básica entre as plaquetas de bainita e martensita é a velocidade de sua formação (LESSA, 2011).

Em uma amostra metalográfica, a bainita tem uma aparência acicular. Segundo REED-HILL (1994), a formação das plaquetas de bainita é também acompanhada de distorções superficiais (inclinações superficiais).

A Figura 3 mostra a microestrutura bainíticas vista através do MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) representada pela formação da cementita com lamelas de ferrita, e ao seu redor tem a martensita.

Dependendo da taxa de resfriamento surgirá estruturas diferentes, podendo formar a estrutura de ripas ou placas, sendo composta por matriz ferrita e por partículas alongadas de cementita (LESSA, 2011).

Figura 3 - Micrografia eletrônica de transmissão com a estrutura bainita. Um grão de bainita passa do lado inferior esquerdo para canto superior direito, que consiste de partículas alongadas e em forma de agulha de Fe₃C dentro de uma ferrita. A fase em torno da bainita é martensita.



Fonte: Metals Handbook (1973).

Existem dois microconstituintes de bainita, a superior e a inferior. A bainita superior é formada em temperaturas maiores e a inferior é formada em temperaturas mais próximas da martensita, ou seja, temperaturas inferiores (LESSA, 2011).

Ocorrem partições (separação) de carbono dentro da austenita residual na bainita superior, e precipitados como cementita entre placas de ferrita bainítica. Na bainita inferior, a ferrita torna-se supersaturada com carbono, em algumas precipitações de carbonetos ocorrem nas sub-unidades de ferrita, bem como entre elas (LESSA, 2011).

A bainita superior é formada por várias tiras finas e estreitas de ferrita chamadas de "ripas" que se encontram separadas por partículas alongadas de cementita. Na bainita inferior, a fase ferrita existe na forma de placas e a precipitação da cementita é mais fina, ocorrendo principalmente no seu interior, na forma de bastões ou lâminas muito finas (CALLISTER JÚNIOR, 2013).

4.9.3 A MARTENSITA

Quando a temperatura de um metal capaz de sofrer uma reação martensítica é reduzida, ele passa por uma temperatura de equilíbrio que separa os intervalos de estabilidade das duas diferentes fases. Abaixo dessa temperatura a energia livre do metal diminui quando ele passa de uma fase estável em alta temperatura para outra

estável em baixa temperatura. Essa variação de energia livre é a principal força motriz para a reação martensítica (REED-HILL, 1994).

A transformação martensítica pode ser definida, portanto, como uma deformação plástica espontânea no estado sólido, ausente de difusão, em resposta às forças químicas internas e/ou esforços externos resultando em um movimento coordenado e/ou cooperativo entre os átomos da fase matriz, inferior ao parâmetro de célula e que mantém uma estreita correspondência de reticulado entre a fase matriz e a fase resultante, porém, agora, com nova estrutura cristalina (SANTOS, 2008).

Neste caso, a energia de deformação da rede distorcida controla a cinética e a morfologia do produto durante a transformação (SANTOS, 2008). Como a difusão é suprimida, normalmente pelo resfriamento rápido, os átomos de carbono não se dividem entre cementita e ferrita, e sim são aprisionados nas posições octaédricas de uma estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), produzindo então, a martensita. A solubilidade de carbono em uma estrutura CCC é excedida quando a martensita se forma, então assume então uma estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC) (KRAUSS, 1995).

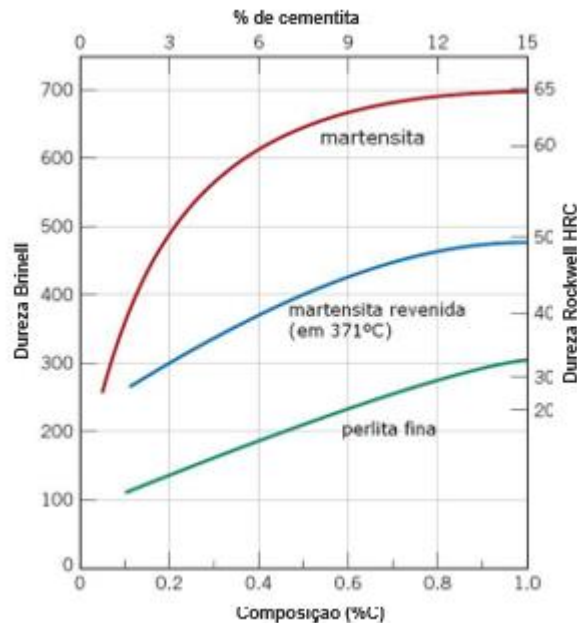
Existem evidências quanto à nucleação das plaquetas de martensita, que se formam heterogeneamente, como na maioria das transformações ou mudanças de fase. Existem também fortes evidências de que os locais onde os núcleos se formam são posições de alta deformação (configurações de discordâncias), chamadas de embriões de deformação (REED-HILL, 1994).

A cinética das transformações martensíticas são geralmente descritas como atérmicas, uma vez que começa a transformação numa temperatura bem definida M_s , mas para a transformação continuar a temperatura precisa diminuir até M_f , que quando alcançada a reação é considerada completa. No entanto, existem reações martensíticas que podem acontecer a uma temperatura constante (BHADESHIA e HONEYCOMBE, 1992).

Das várias microestruturas que podem ser produzidas para um dado aço, a martensita é a mais dura e a mais frágil. Ela possui ductilidade desprezível, mas a resistência mecânica e a dureza da martensita não estão relacionadas à microestrutura. A grande distorção na estrutura produzida com a grande quantidade de defeitos cristalinos, tais como discordâncias e supersaturação de átomos de carbono que dificultam o movimento das discordâncias. Os poucos sistemas de escorregamento para estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC) são os fatores

responsáveis por este ganho de propriedades mecânicas. Sua dureza é dependente do teor de carbono, que representa cerca de 0,6% da massa total como demonstrado no Gráfico 8 (CALLISTER JÚNIOR, 2007).

Gráfico 8 - Dureza da martensita e perlita fina como função da porcentagem em peso de carbono.



Fonte: Callister Júnior (2007).

A austenita é ligeiramente mais densa do que a martensita e, portanto, durante a transformação de fase no resfriamento, há um aumento de volume. Conseqüentemente, peças relativamente grandes que são rapidamente temperadas podem trincar como um resultado de tensões internas. Isto se torna um problema especialmente quando o teor de carbono é maior do que 0,5% em massa (LESSA, 2011).

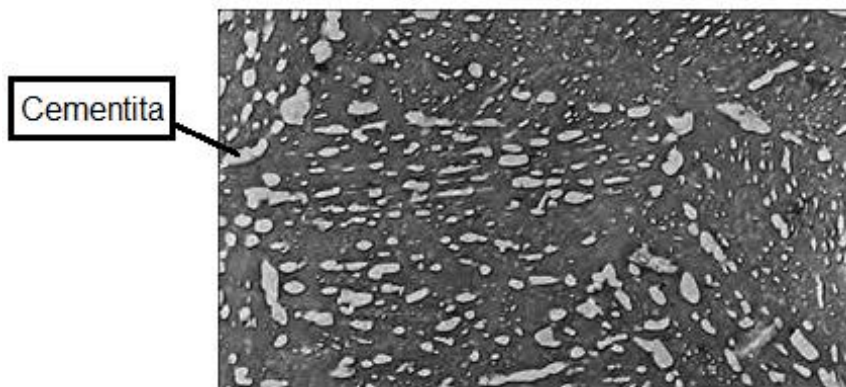
4.9.3.1 A Martensita Revenida

No estado como temperado, a martensita, além de possuir alta dureza, é tão frágil que ela não pode ser usada para a maioria das aplicações. Qualquer tensão interna que possam ter sido introduzidas durante a têmpera tem um efeito fragilizante (CALLISTER JÚNIOR, 2007).

Se a martensita for aquecida para uma temperatura onde os átomos de carbono tenham mobilidade, estes irão difundir a partir dos interstícios octaédricos para formar carbonetos. Como resultado, a tetragonalidade é “aliviada”, sendo a martensita

substituída por uma mistura de partículas de cementita uniformemente dispersas embutidas dentro de uma matriz contínua de ferrita, ficando de acordo com o diagrama Fe-C. Esta decomposição da martensita é chamada de revenido. Isto é similar à microestrutura de esferoidita exceto pelo fato de que as partículas de cementita são muito menores. Uma micrografia eletrônica mostrando a microestrutura da martensita revenida com grande ampliação está apresentada na Figura 4 (LESSA, 2011).

Figura 4 - Micrografia eletrônica de martensita revenida. O revenimento foi realizado a 594°C. As partículas pequenas são de fase cementita; a fase matriz é de ferrita- α . 9300x.



Fonte: Callister Júnior (2007).

A martensita revenida é constituída de finos carbonetos dispersos em uma matriz ferrítica. A nucleação da austenita a partir desta estrutura inicia na interface carboneto/ferrita e principalmente nas interfaces dos carbonetos presentes no contorno de grão ferrítico e finaliza quando todo carboneto da estrutura for dissolvido (LOPES; COTA, 2014).

O tratamento térmico de revenimento determina o tamanho das partículas de cementita. Variáveis de tratamento térmico são temperatura e tempo, e a maioria dos tratamentos são realizados em temperatura constante. Uma vez que a difusão de carbono está envolvida na transformação de martensita para martensita revenida, o aumento da temperatura acelerará a difusão, a taxa de crescimento das partículas de cementita e, subsequentemente, a taxa de amolecimento (CALLISTER JÚNIOR, 2007).

4.9.4 FERRITA

A ferrita presente nos aços pode ser classificada em ferrita δ e ferrita α . Tradicionalmente define-se ferrita α como solução sólida de carbono em ferro CCC,

existente até a temperatura de 912°C, com solubilidade de carbono máxima de 0,0218% a 727°C e 0,008%C a temperatura ambiente. A Ferrita δ também possui estrutura CCC, ocorrendo para temperaturas entre 1394°C e 1538°C com teor de carbono máximo de 0,09% a 1495°C. Os nomes ferrita α e ferrita δ são usados para indicar a mesma solução sólida de carbono em ferro CCC, porém ocorrendo em diferentes faixas de temperatura (SILVA; MEI, 1988).

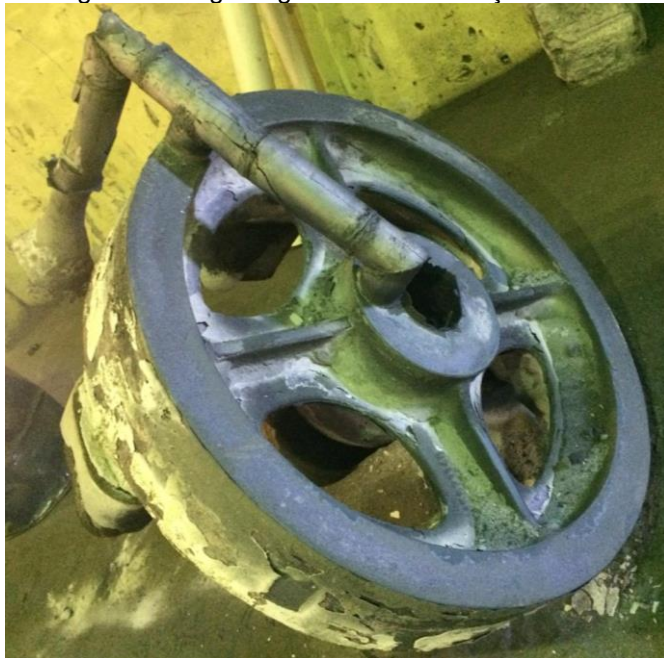
Existe uma dificuldade em determinar a diferença entre ferrita α e δ , pois elas são idênticas em suas estruturas cristalinas. A diferença entre as duas é que a δ apresenta formatos de dendrita durante a solidificação e a α possui morfologia alotriomórfica derivada da transformação da austenita no estado sólido (YI, 2014).

Em condições equilíbrio, a ferrita pro-eutetoide será sempre formada em ligas contendo até 0,78% de carbono (composição eutetóide). A reação de formação da ferrita ocorre em 910°C para o ferro puro e entre 910°C e 723°C para aços hipoeutetóides. No entanto, se for submetido a têmpera a partir da região austenítica, a ferrita pode ser formada em temperaturas mais baixas, tão baixas quanto 600°C e dependendo da taxa de resfriamento e do tratamento, a ferrita se formará com diferentes morfologias. Esta alteração morfológica ocorre com a diminuição da temperatura de transformação da ferrita (HONEYCOMBE et al., 2006).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar os objetivos propostos neste trabalho foram analisadas duas categorias de aços comumente usados para fabricação das engrenagens, com o objetivo de avaliar a possibilidade de substituição como matéria prima do aço fundido SAE-1045 pelo aço fundido SAE-4140. Para os experimentos foram fabricados corpos de prova dos dois materiais, para realização dos ensaios de dureza, metalografia e o Jominy, comparando as propriedades mecânicas e caracterização microestruturais das amostras. A Figura 5 mostra a engrenagem foco deste estudo.

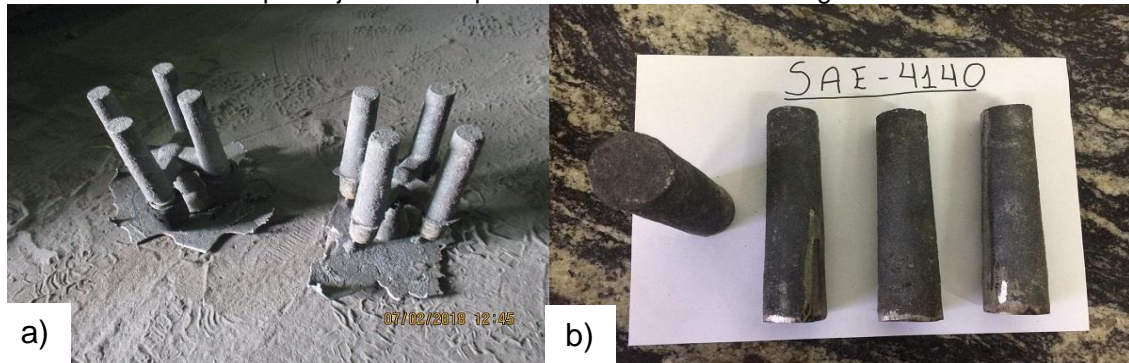
Figura 5 - Engrenagem fundida em aço.



Fonte: Do autor.

A fabricação inicial dos corpos de prova foi feita através do processo de fundição, onde um modelo foi preenchido com areia e resina uretânica formando o molde onde o metal líquido foi vazado, com o resultado final mostrado na Figura 6.

Figura 6 - Corpos de prova brutos de fundição, onde: a) Metais fundidos desmoldados e b) Corpos de prova já cortadas para serem enviados a usinagem.



Fonte: Do autor.

Ao total foram fundidos 16 corpos de prova de \varnothing 35 x 130 mm, 8 de cada material para serem usados nos ensaios Jominy, dureza e metalográfico.

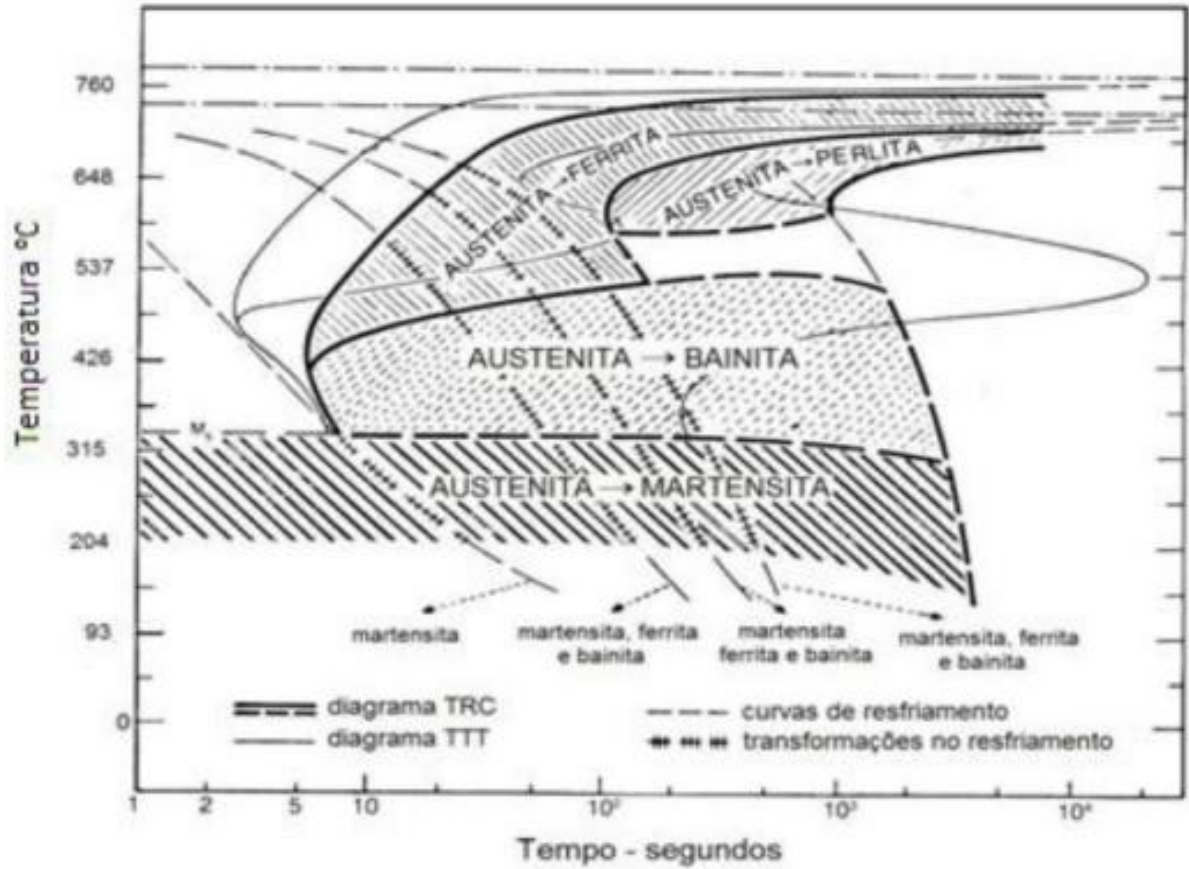
5.1 ANÁLISE QUÍMICA DOS AÇOS

A análise química foi realizada em um espectrômetro da marca SPECTRO MAXX, com o objetivo de validar os materiais, assim classificando os aços como SAE-1045 e SAE-4140, pelo processo de espectrometria de emissão ótica que é o meio mais eficaz para efetuar uma análise química nos aços.

5.2 TRATAMENTO TÉRMICO

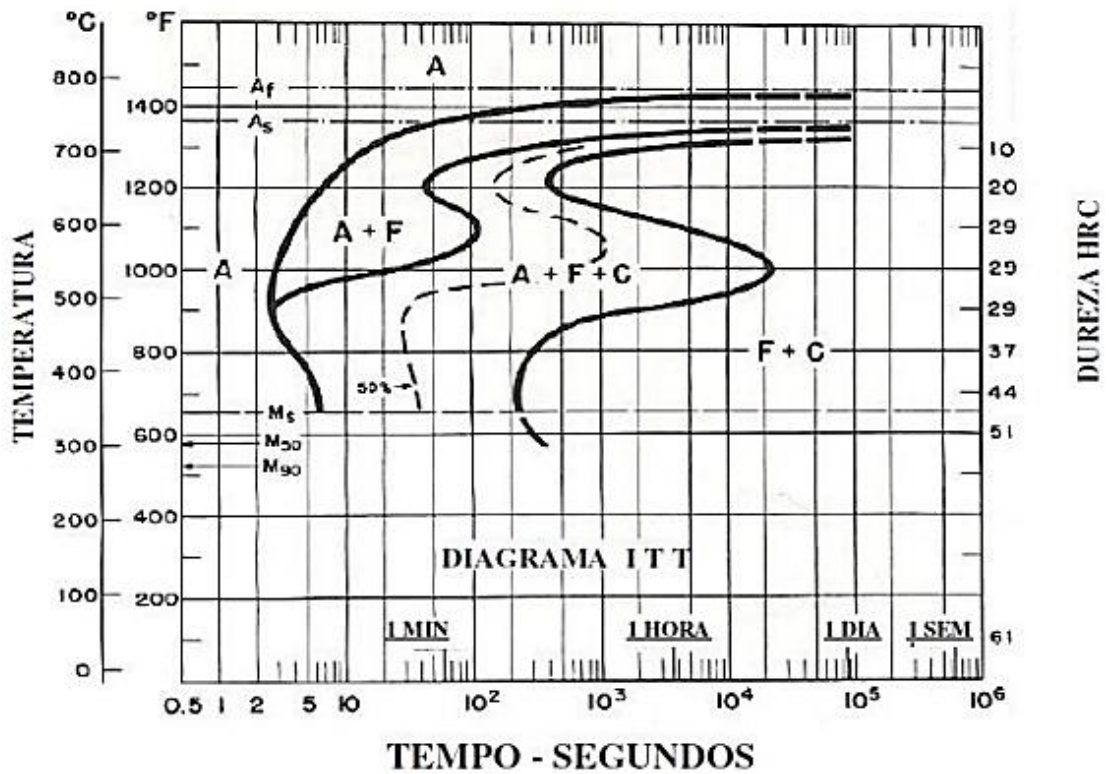
Após solidificação e resfriamento na fundição, os corpos de prova passaram pelo processo de tratamento térmico de normalização a uma temperatura de 950°C por 2 horas. Para os tratamentos térmicos industriais as peças são comumente resfriadas da temperatura de austenitização até a temperatura ambiente, utilizam-se curvas de resfriamento contínuo que descrevem as transformações em resfriamento contínuo. Assim, cada composição química formará um tipo de curva, mostrado nos Gráficos 9 e 10.

Gráfico 9 - Diagrama TTT para aço SAE 4140.



Fonte: Krauss (2000).

Gráfico 10 - Diagrama CCT (Continuous Cooling Transformation) do aço SAE 1045.



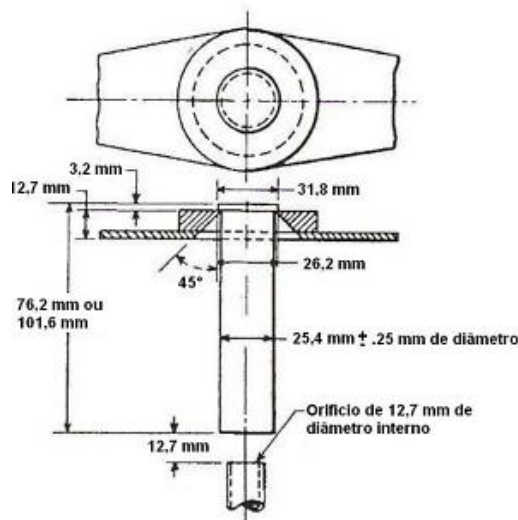
Fonte: Nunura (2009).

Constam nos Gráficos 9 e 10 os diagramas TTT e CCT para cada material, que demonstram os microconstituintes que poderão ser formados em virtude da taxa de resfriamento, com os gráficos é possível identificar que ambos os materiais podem formar martensita, o constituinte endurecedor do aço.

5.3 ENSAIO JOMINY

Os corpos de prova foram usinados conforme a geometria especificada na norma ASTM A-255 que trata da determinação da temperabilidade nos aços, mostrado na Figura 7 (ASTM A255, 2002, p. 03).

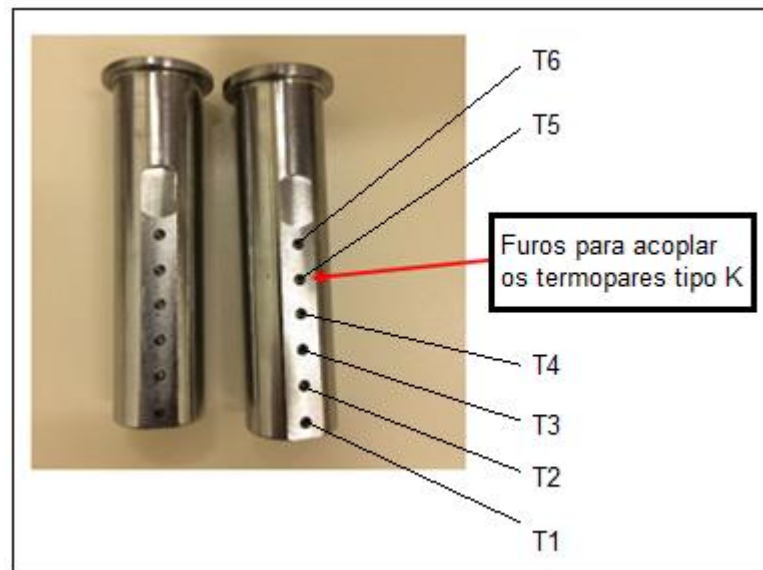
Figura 7 - Especificação das medidas do corpo de prova para execução do Ensaio Jominy.



Fonte: ASTM A-255, Adaptado por Nunura (2009), Scheidemantel (2014).

Após a usinagem foi analisada a integridade dos corpos de prova, conforme a norma ASTM A-255 (SCHEIDEMANTEL, 2014). A Figura 8 mostra os corpos de prova para o ensaio Jominy prontos com furação para acoplamento dos termopares tipo K, onde é um termopar de uso genérico, possui um baixo custo e, devido à sua popularidade estão disponíveis variadas sondas. Cobrem temperaturas entre os -200 e os 1200 °C, tendo uma sensibilidade de aproximadamente $41 \mu V/^{\circ}C$, onde foi emitido uma leitura de 0,25°C por segundo.

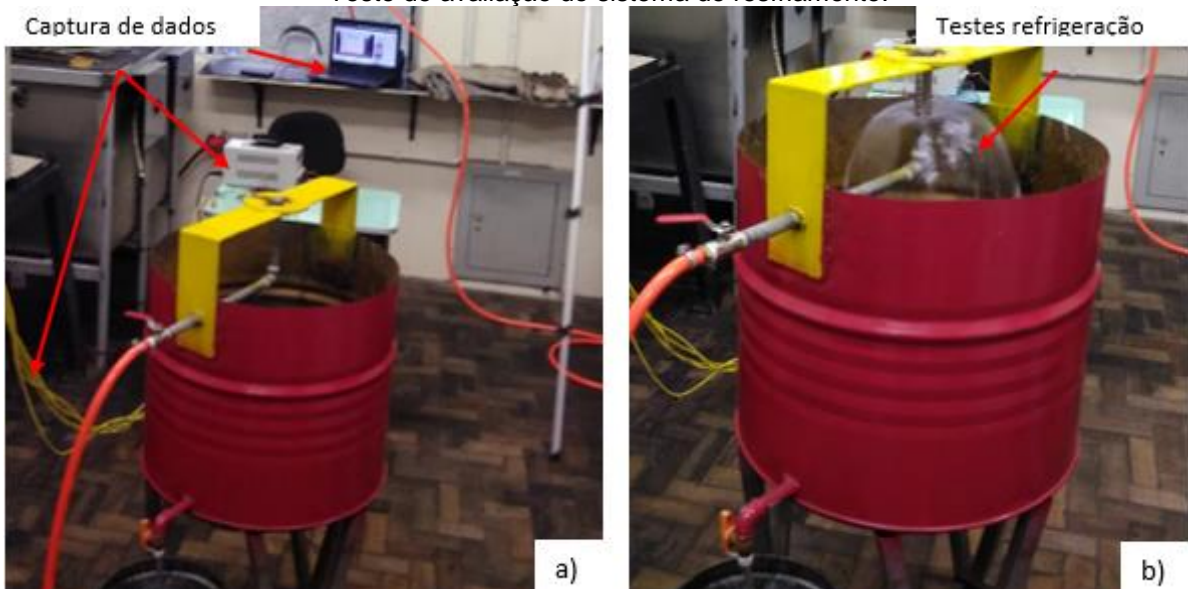
Figura 8 - Corpo de prova para execução do teste Jominy.



Fonte: Do autor.

Na Figura 8 os furos nos corpos de prova servem para medir a taxa de resfriamento em cada ponto, para correlacionar com os microconstituintes formados. A Figura 9 mostra o equipamento utilizado para a realização dos Ensaios Jominy.

Figura 9 - Equipamento para o Ensaio Jominy: a) sistema de captura de dados de temperatura e b) Teste de avaliação do sistema de resfriamento.



Fonte: Do autor.

À medida que era fabricado os corpos de provas para os ensaios, foi desenvolvido um equipamento para o Ensaio Jominy, pelo aluno Luiz Gustavo Peruch da UNISATC em um trabalho de conclusão de curso, em modelo similar ao construído por Dubiela (2016).

Como diferencial do projeto do ensaio Jominy desenvolvido pelos alunos em TCC, foi a capacidade de obtenção das temperaturas de forma instantânea a medida que o corpo de prova é aquecido no forno de indução e resfriado no equipamento de ensaio Jominy.

Os termopares foram acoplados a uma placa de captura de dados da marca National Instruments®. Para realizar a leitura dos dados foi desenvolvido um programa no LabVIEW®. A Figura 10 mostra o resfriamento dos corpos de prova e os termopares instalados nos corpos de prova.

Figura 10 - Procedimento de temperabilidade, Ensaio Jominy, onde a) Termopares instalados no corpo de prova e b) sentido de resfriamento do corpo de prova



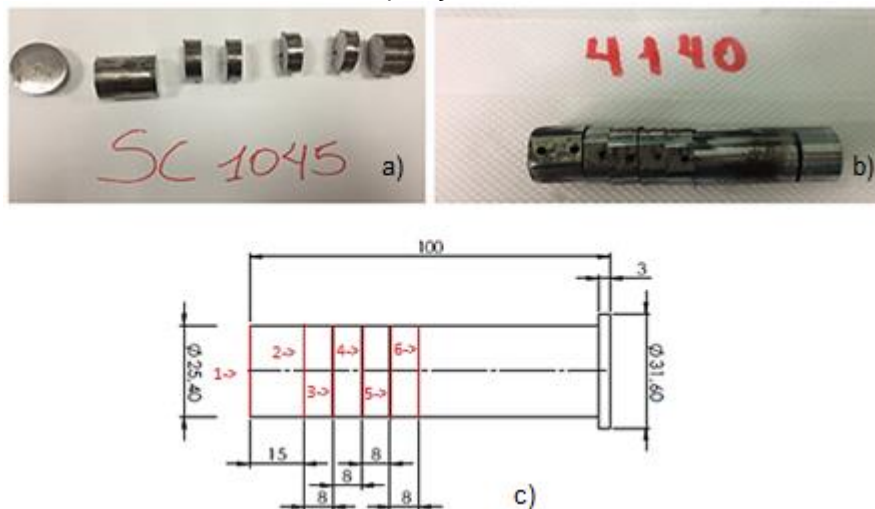
Fonte: Do autor.

Os corpos de prova foram austenitizados com uma rampa de subida de 100°C/h dentro do forno até atingir 950°C em um tempo de encharque de 1 hora e na sequência, resfriado com um jato d'água corrente na extremidade inferior. Conforme procedimento escrito na norma ASTM A-255.

5.4 IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS

Após o ensaio Jominy foram realizados testes de caracterização para as duas classes de aços, SAE-1045 e SAE-4140, estudados. Para a identificação da posição no corpo de prova e não perder a relação da taxa de resfriamento, foram cortadas 5 posições e identificadas. O primeiro corte a 15 mm da superfície de contato com a água os outros seguiram um padrão de 8 mm de distância e cortados na posição do furo, conforme a Figura 11, para avaliar a dureza, microestruturas e temperabilidade ao longo dos corpos de prova.

Figura 11 - a) Corpo de prova aço SAE-1045 cortado; b) Aço SAE-1045 cortado; c) Desenho indicando as distâncias das posições das amostras de 1-> até 6->.



Fonte: Do autor.

Este padrão de distância seguiu o padrão de furação para instalação dos termopares. Assim, teve se a temperatura e o tempo de resfriamentos medidos em um ponto específico, possibilitando analisar a microestrutura do material, comparando com o tempo de resfriamento com diagrama TTT para cada material.

5.5 ENSAIO DE DUREZA E METALOGRAFIA

O ensaio de dureza e metalografia foram relacionados com o Ensaio Jominy, utilizado para verificação da temperabilidade dos aços e acompanhar as mudanças microestruturais em função da taxa de resfriamento. A relação entre dureza e metalografia está associado a microestrutura que se forma nos aços através do

tratamento térmico. O ensaio de dureza foi realizado através do durômetro de bancada HR-001 com escala Rockwell C, medindo as durezas nas 6 posições em cada corpo de prova analisado.

O procedimento de metalografia foi realizado em 6 amostras, utilizando lixas de diferentes mesh, polimento e ataque químico com ácido Nítrico com concentração de 2%. Após o ataque químico, imagens foram obtidas com um microscópio Topcon modelo 1810483 com aproximação de 100X.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Depois de realizados os estudos comparativos de temperabilidade para a substituição do aço SAE-1045 para o aço SAE-4140 aplicado a engrenagens fundidas, será descrito a seguir resultados obtidos e considerações relevantes do processo e das análises constatados.

6.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A análise química realizada nas amostras dos aços SAE-1045 e SAE-4140 após o processo de fundição é mostrado na Tabela 7.

Tabela 7 – Composição química dos aços SAE-1045 e SAE-4140.

Aço SAE-1045						
C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S
0,47	0,55	0,82	0,08	0,012	0,02	0,015
Aço SAE-4140						
C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S
0,42	0,33	0,84	0,99	0,245	0,018	0,012

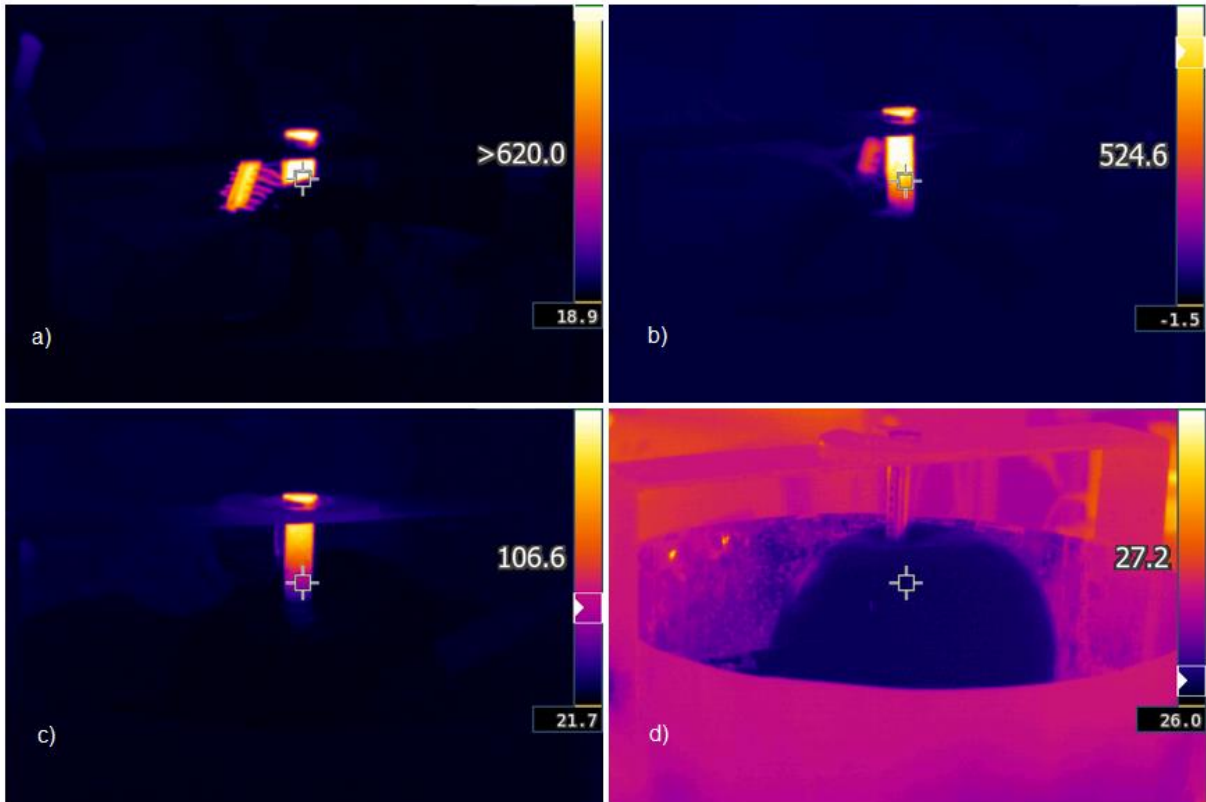
Fonte: Do autor.

A composição química retirada das amostras indica que o material fundido, para ambos os corpos de prova estão dentro da faixa de tolerância exigida pela norma ASTM A-958 Grau 1045 e Grau 4140. O percentual de silício no aço 1045, por se tratar de um material fundido, apresenta uma faixa entre 0,3 e 0,6%.

6.2 ENSAIO JOMINY

Para o ensaio Jominy realizado, em ambos os aços foi utilizada uma câmera térmica para acompanhamento das temperaturas, conforme Figura 12.

Figura 12 - Ensaio Jominy do aço SAE-1045 através de uma câmera térmica: a) termografia do corpo de prova a 620°C, b) Corpo de prova a 524°C, c) Corpo de prova a 106°C e d) a temperatura da água em contato com o corpo de prova.

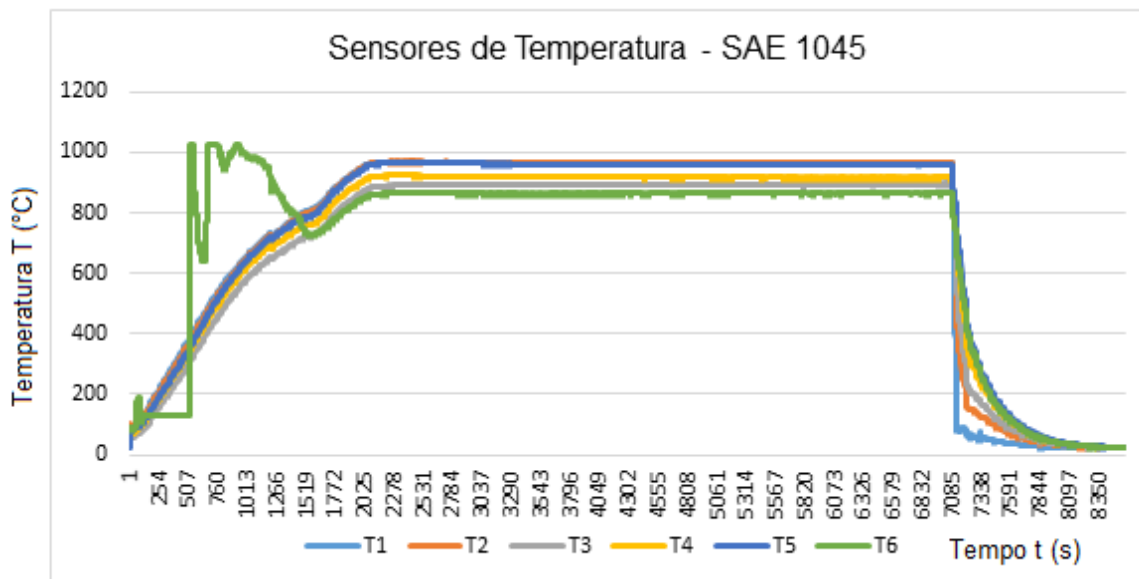


Fonte: Do autor.

A partir do ensaio Jominy realizado para determinar a temperabilidade a fim de se constatar as temperaturas alcançadas em momentos específicos de resfriamento da têmpera, através de uma câmera termográfica, constata-se na Figura 12a o corpo de prova na parte superior com 620°C de temperatura já em etapa de resfriamento. Na figura 12b é apresentado a medição térmica no meio do corpo de prova a uma temperatura de 524°C. Já na figura 12c a medição de temperatura ocorreu mais próximo da fonte resfriadora na parte inferior do corpo de prova, apresentando temperatura de 106°C, enquanto na figura 12d a temperatura da água após contato com o corpo de prova é de 27°C.

Foram posicionados 6 termopares com sensores de temperatura nos corpos de prova Jominy dos aços SAE 4140 e SAE 1045, para realizar a medição do tempo e da taxa de resfriamento de ambos, no período em que acontecem as transformações micro estruturais completas. O Gráfico 11 mostra a temperatura de ensaio medido pelos termopares.

Gráfico 11 - Medição tempo x temperatura, através de sensores do aço SAE1045.



Fonte: Do autor.

O Gráfico 11, apresenta os sensores posicionados no corpo de prova de SAE 1045, onde na leitura do termopar 1 (T1) ao termopar (T6), apresentaram temperatura máxima de 958°C, dando início ao processo de resfriamento quando chegaram aos 728°C, que é a temperatura da zona crítica do aço. Conseqüentemente, tem-se a austenita no início da decomposição, em um processo que teve duração de 50 segundos e uma média de taxa de resfriamento de 6,14 °C/s. Vale destacar quanto ao termopar (T6) que a medição deve ser considerada válida a partir dos 1519 segundos, haja visto que, antes desse instante, o mesmo sofreu um pico de medição devido a uma interferência elétrica no momento do ensaio. A Tabela 8 mostra a taxa de resfriamento para os ensaios no aço SAE 1045.

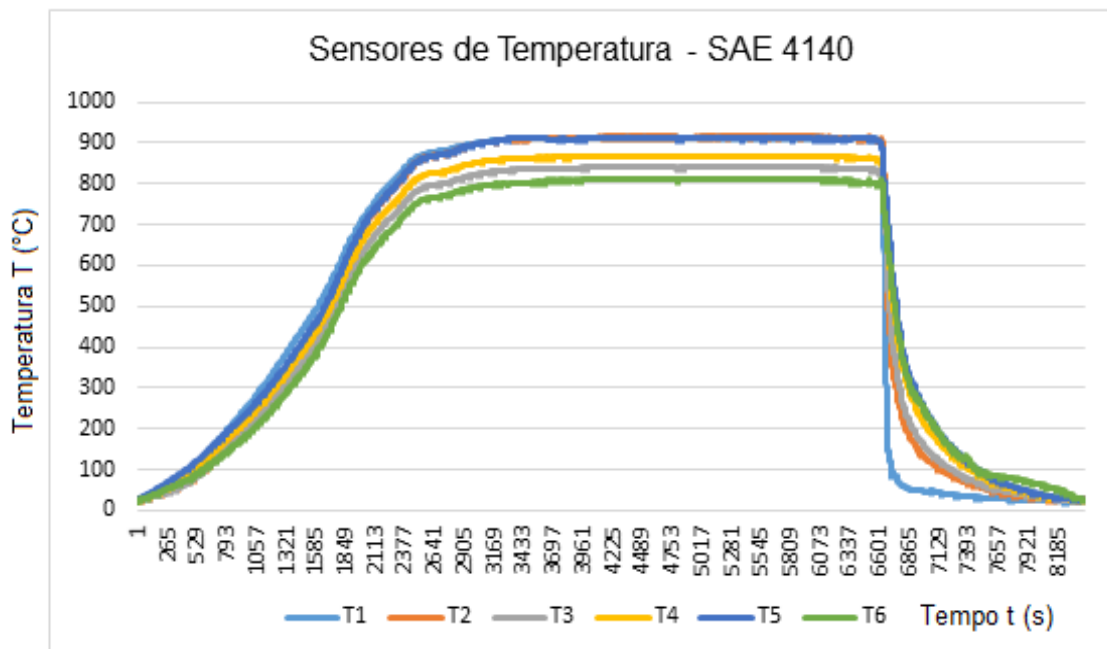
Tabela 8 - Medição do tempo e taxa de resfriamento da decomposição total da austenita, aço SAE 1045.

Tempo e Taxa de Resfriamento, SAE 1045		
Termopar	Tempo (s)	Taxa de Resfriamento (C°/s)
T1	21	10,95
T2	38	6,05
T3	42	5,48
T4	45	5,11
T5	49	4,69
T6	50	4,60

Fonte: Do autor.

Conforme visto na Tabela 8, a maior taxa de resfriamento apresentada ocorreu no termopar T1 a 10,95 °C/s, onde em 21 segundos ocorreu a decomposição total da austenita. Isso acontece pelo fato de o termopar T1 estar mais próximo da fonte resfriadora. Por outro lado, a queda de temperatura ocorrida no termopar T6, o mais distante da fonte resfriadora, fez com que a austenita se decompôs-se por completo em 50 segundos, gerando uma taxa de resfriamento de 4,60 °C/s. O Gráfico 12 mostra a medição de temperatura durante o ensaios Jominy para o aço SAE 4140.

Gráfico 12 - Medição temperatura x tempo, através de sensores do aço SAE4140



Fonte: Do autor.

A partir da análise do Gráfico 12 a temperatura mais alta medida pelos termopares foi de 906°C, salienta-se que o processo de decomposição da austenita ocorreu em 72 segundos, a uma taxa de resfriamento médio de 3,5°C/s, ou seja, esta taxa de resfriamento é menor do que comparada à do aço SAE 1045, devido aos elementos de liga do SAE 4140 que aumentam o tempo da curva de transformação da austenita.

A Tabela 9 mostra a taxa de resfriamento para os ensaios no aço SAE 4140.

Tabela 9 - Medição do tempo e taxa de resfriamento da decomposição total da austenita, aço SAE 4140.

Tempo e Taxa de Resfriamento da decomposição total da Austenita, SAE 4140		
Termopar	Tempo (s)	Taxa de Resfriamento (C°/s)
T1	34	5,24
T2	42	4,24
T3	53	3,36
T4	57	3,12
T5	69	2,58
T6	72	2,47

Fonte: Do autor.

Com base na Tabela 9, a taxa de resfriamento do termopar T1 do aço SAE 4140 apresentou 5,24°C/s, sendo mais baixa que o termopar T1 do aço SAE 1045. Se considerarmos o termopar T6 a decomposição da austenita foi completada em 72 segundos com uma taxa de resfriamento de 2,47°C/s. Com tudo devido aos elementos de liga que compõe o aço SAE 4140 a sua taxa de resfriamento será inferior quando comparado com o aço SAE 1045.

6.3 ENSAIO DUREZA

As tabelas abaixo demonstram os resultados do ensaio de dureza nos corpos de prova que sofreram o ensaio Jominy. A Tabela 10 mostra os valores de dureza alcançados no ensaio Jominy para aço SAE 1045.

Tabela 10 - Medições de dureza SAE 1045 em Rockwell C.

SAE – 1045 – Medições de dureza				
Posição de corte no corpo de prova	1°	2°	3°	Média de dureza (HRC)
1->	57	54	55	55
2->	31	34	32	32
3->	32	31	33	32
4->	27	27	29	28
5->	25	26	26	26
6->	21	22	22	22

Fonte: Do autor.

Foram ensaiadas três medições de dureza tipo Rockwell C para cada corte realizado no corpo de prova Jominy, tanto para o material SAE-1045 indicado na Tabela 10 como para o SAE-4140 indicado na Tabela 11, e atingido a média de dureza que será considerada. Como é possível ser observado na tabela, as medições se deram por meio da fonte resfriadora em 6 posições de corte distintas. A partir dos dados obtidos, a análise aponta que houve queda acentuada da dureza da posição 1-> para a posição 2-> de 55 HRC para 32 HRC, com apenas 15mm de profundidade de têmpera. Partindo do ponto 2-> até o ponto 6-> verifica-se que ocorreu a cada 8 mm de distância do corpo de prova uma perda média de dureza de 2 HRC por posição de corte.

Tabela 11 - Medições de dureza SAE 4140 em Rockwell C.

SAE – 4140 – Medições de dureza				
Posição de corte no corpo de prova	1°	2°	3°	Média de dureza (HRC)
1->	62	63	63	63
2->	61	60	61	61
3->	59	56	58	58
4->	56	58	56	57
5->	54	54	55	54
6->	47	54	51	51

Fonte: Do autor.

Diante dos dados expostos na Tabela 11, a análise não apontou queda de dureza significativa da posição 1-> para a posição 2->, sendo de 63 HRC para 61 HRC com 15 mm de profundidade. Foi constatado do ponto 2-> até o ponto 6-> uma perda média de dureza de 3 HRC, porém se mantendo a uma dureza superior de 51 HRC apresentado na posição 6->, que está localizada mais distante da fonte resfriadora.

A Tabela 12 mostra a comparação de dureza obtidas nos ensaios Jominy com os aços SAE 1045 e SAE 4140.

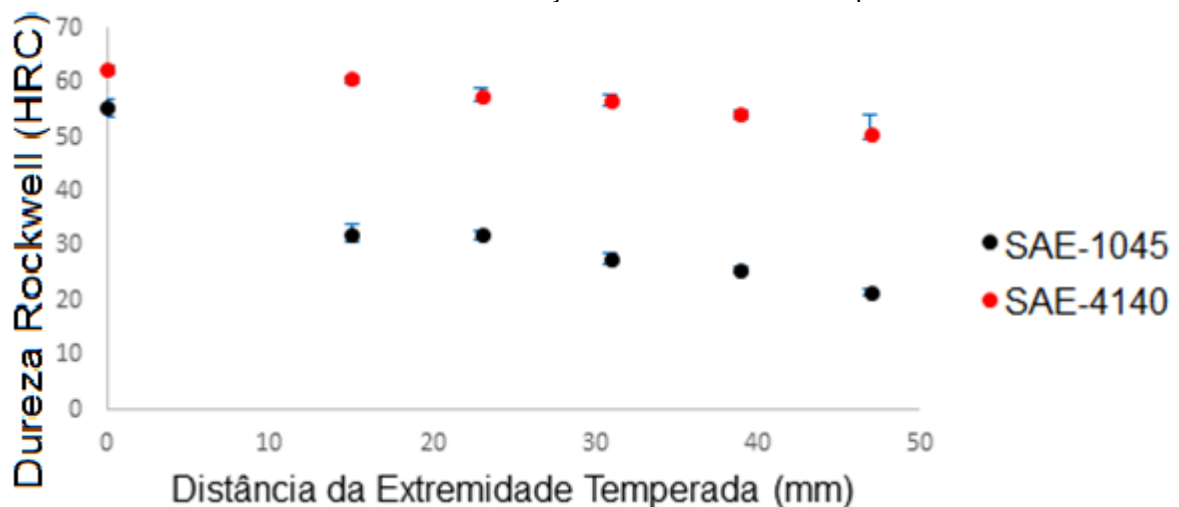
Tabela 12 - Dureza média dos corpos de prova SAE-4140 e SAE-1045, após ensaio Jominy em Rockwell C.

Dureza média dos corpos de prova SAE-4140 e SAE-1045					
Posição de corte no corpo de prova	Distância (mm)	Dureza média do aço SAE 1045 (HRc)	Desvio Padrão	Dureza média do aço SAE 4140 (HRc)	Desvio Padrão
1 ->	0	55	2	63	1
2 ->	15	32	2	61	1
3 ->	23	32	1	58	2
4 ->	31	28	1	57	1
5 ->	39	26	1	54	1
6 ->	47	22	1	51	4

Fonte: Do autor.

Os valores de dureza no ensaio Jominy indicam que a resistência mecânica do aço SAE-4140 é maior que a do aço SAE-1045, refletindo em uma maior dureza da engrenagem. Na 6ª posição de corte, praticamente o aço SAE-1045 apresenta uma estrutura perlítica de aspecto normalizado, enquanto o aço SAE-4140 ainda apresenta uma estrutura martensítica, graças aos elementos de liga presentes no aço. O Gráfico 13 demonstra o perfil de dureza após ensaio Jominy, apresentado a média das medidas e o desvio padrão.

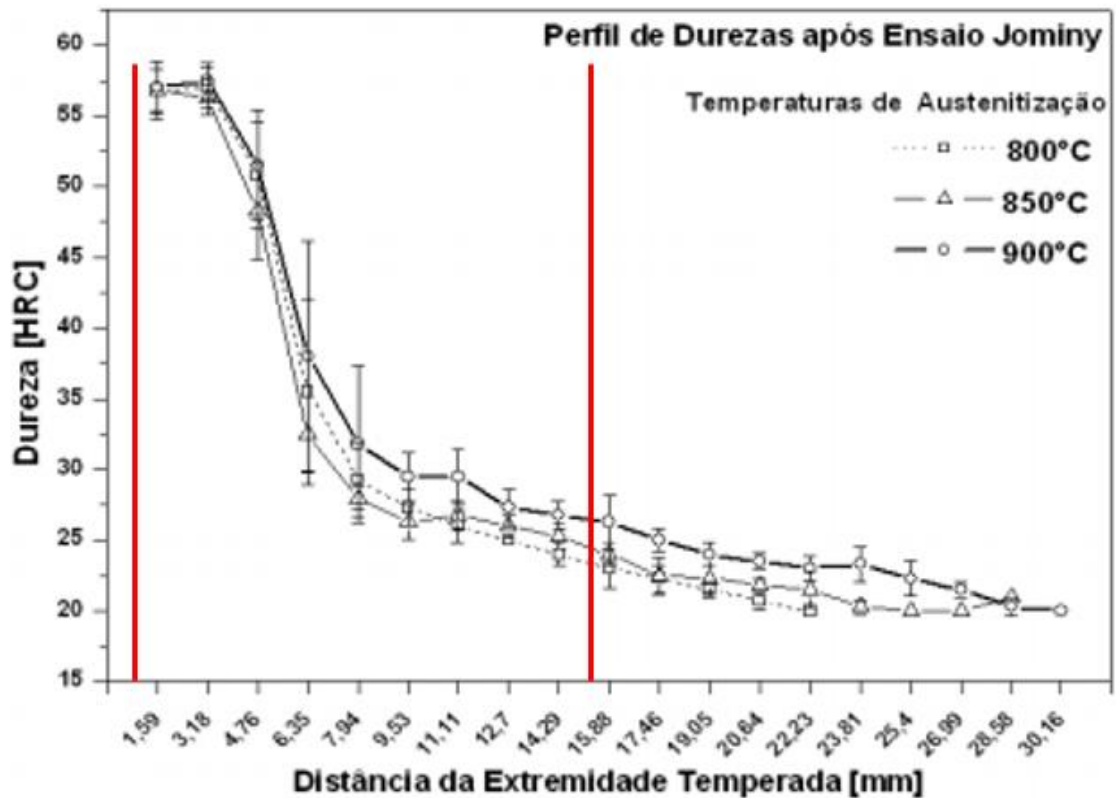
Gráfico 13 - Média de dureza dos aços ensaiados e o desvio padrão medido.



Fonte: Do autor.

O resultado do perfil de dureza do aço SAE-1045 é similar ao obtido por Nunura (2009), onde o autor realizou mais medidas de dureza entre as distâncias de 0 à 15 mm. Nesta região ocorreu uma redução forte na dureza do aço. O Gráfico 14 mostra a curva de dureza obtido por Nunura (2009) para o Ensaio Jominy do aço ABNT 1045.

Gráfico 14 - Perfil de dureza após ensaio Jominy para o aço ABNT 1045.



Fonte: Nunura (2009).

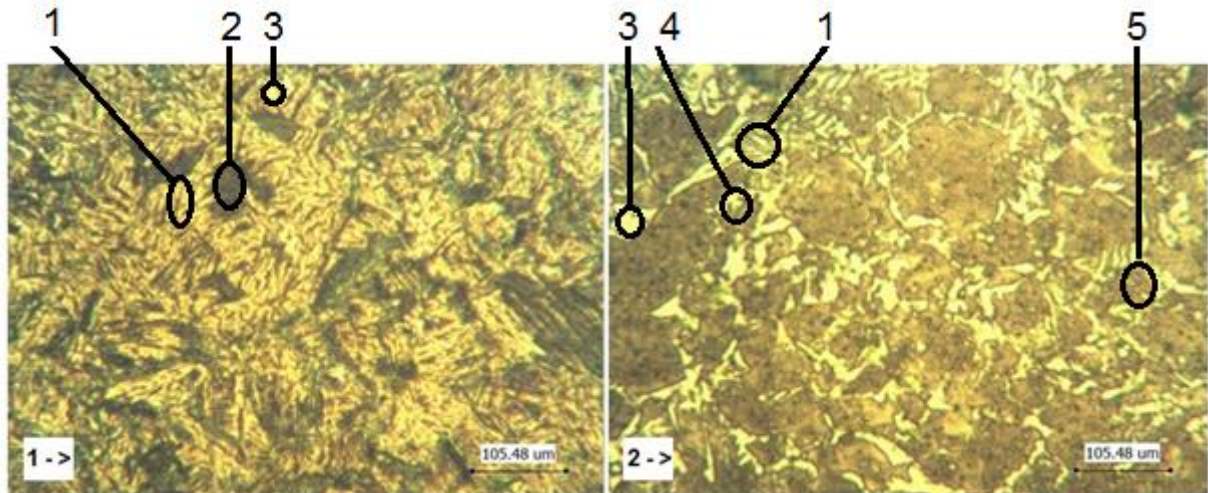
Avaliando os resultados de Nunura (2009) e comparando com os obtidos no experimento, verifica-se que não se pode ligar pontos para avaliar o perfil de dureza de um material. Ao ligar os pontos, pode-se estar induzindo que os valores entre os pontos medidos seguem a tendência de uma reta, mas nem sempre isso é correto. A medição de dureza é pontual e avalia a dureza somente no ponto medido.

6.2 ENSAIO DE METALOGRAFIA

Neste tópico estão sendo demonstrados os resultados gerados mediante os ensaios de metalografia que tiveram sua superfície atacada por ácido nítrico 2%, reproduzidos a uma aproximação microscópica de 100x para ambos os aços, SAE-

1045 e SAE-4140. A Figura 13 mostra as imagens metalográficas do aço SAE 1045 após ensaio Jominy nas posições 1 e 2 dos corpos de prova.

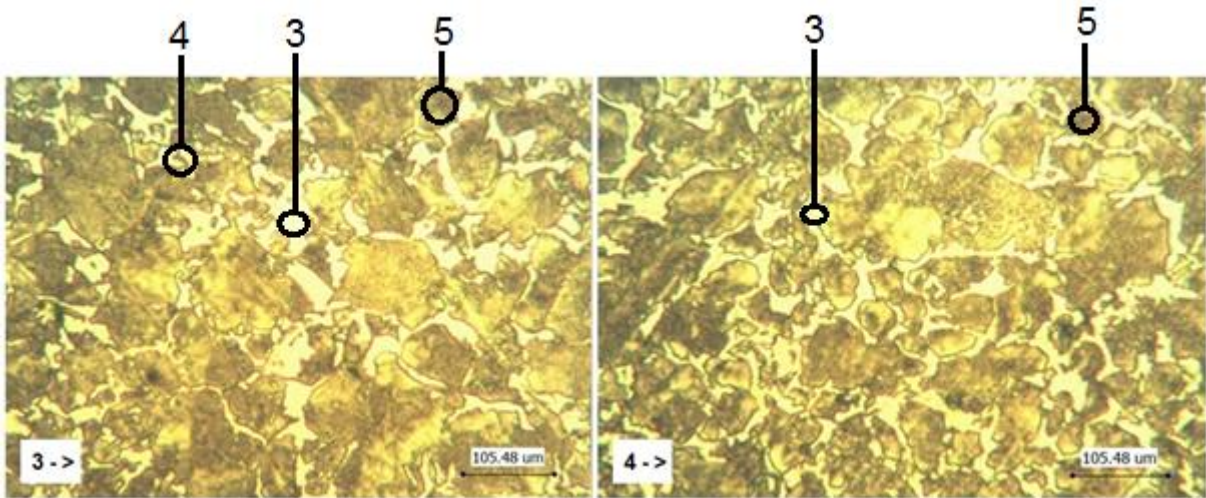
Figura 13 - Metalografias do aço SAE 1045, resfriamento em água, amostras "1->" e "2->", ataque com ácido nítrico 2% aproximação 100X.



Fonte: Do autor.

A Figura 13 refere-se ao aço SAE 1045 e apresenta dois pontos de corte, sendo eles o "1->" e o "2->", onde em "1->" consta na imagem metalográfica o constituinte martensita (1) em formas de agulhas com pequenos contornos escuros de austenita supersaturada (2) em carbono mais ferrita, em contato direto com a fonte resfriadora, enquanto em "2->" a metalografia corresponde a presença dos constituintes bainita (4), perlita fina (5) e ferrita (3), com pequenas agulhas de martensita, sendo sua superfície com uma distância de 15 mm da fonte resfriadora. A Figura 14 mostra as imagens metalográficas do aço SAE 1045 após ensaio Jominy nas posições 3 e 4 dos corpos de prova.

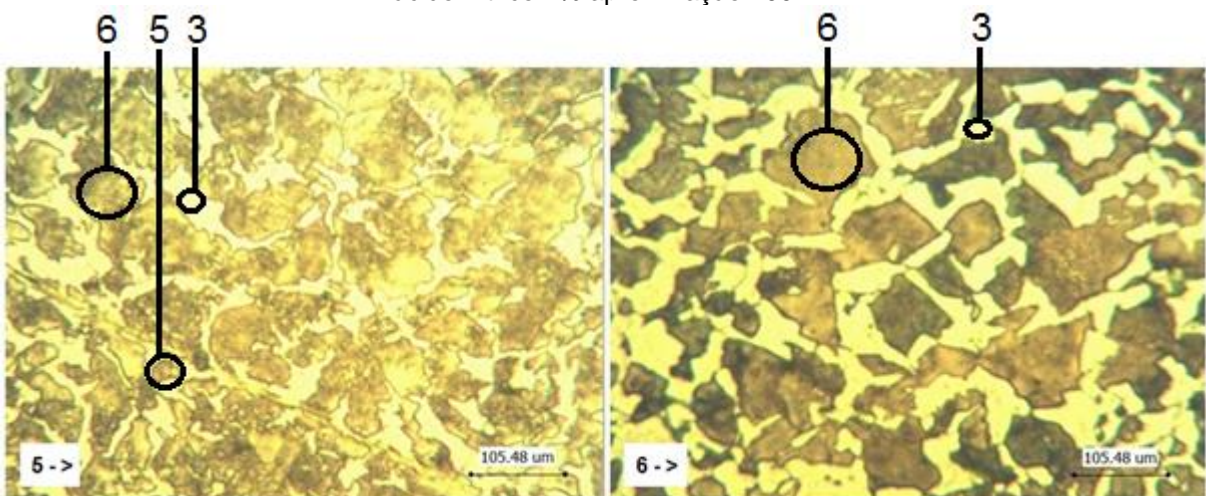
Figura 14 - Metalografia do aço SAE 1045, resfriamento em água, amostras “3->” e “4->”, ataque com ácido nítrico 2% aproximação 100X.



Fonte: Do autor.

A Figura 14 faz referência ao aço SAE 1045 e mostra dois pontos de corte, sendo eles o “3->” e o “4->”, onde em “3->” consiste a imagem metalográfica formada por bainita (4), perlita fina (5) e ferrita (3), com sua superfície a uma distância de 23 mm da fonte resfriadora, já em “4->” a metalografia aborda a presença de perlita fina (5) e ferrita (3), com distância de 31 mm da fonte resfriadora. A Figura 15 mostra as imagens metalográficas do aço SAE 1045 após ensaio Jominy nas posições 5 e 6 dos corpos de prova.

Figura 15 - Metalografia do aço SAE 1045, resfriamento em água, amostras “5->” e “6->”, ataque com ácido nítrico 2% aproximação 100X.

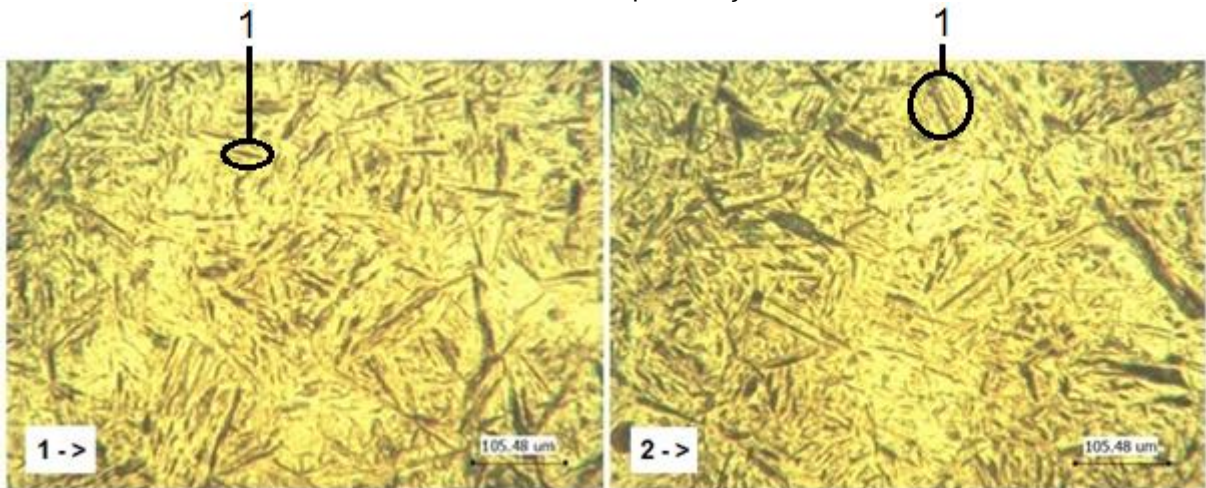


Fonte: Do autor.

A Figura 15 trata do aço SAE 1045 e expõe dois pontos de corte, sendo eles o “5->” e o “6->”, onde em “5->” encontra-se na imagem metalográfica os constituintes

perlita fina (5), perlita grossa (6) e ferrita (3), com sua superfície a uma distância de 39 mm da fonte resfriadora, ao passo que em “6->” a metalografia exibe a presença dos constituintes perlita grossa (6) e ferrita (3), com uma distância de 47 mm da fonte resfriadora. A Figura 16 mostra as imagens metalográficas do aço SAE 4140 após ensaio Jominy nas posições 1 e 2 dos corpos de prova.

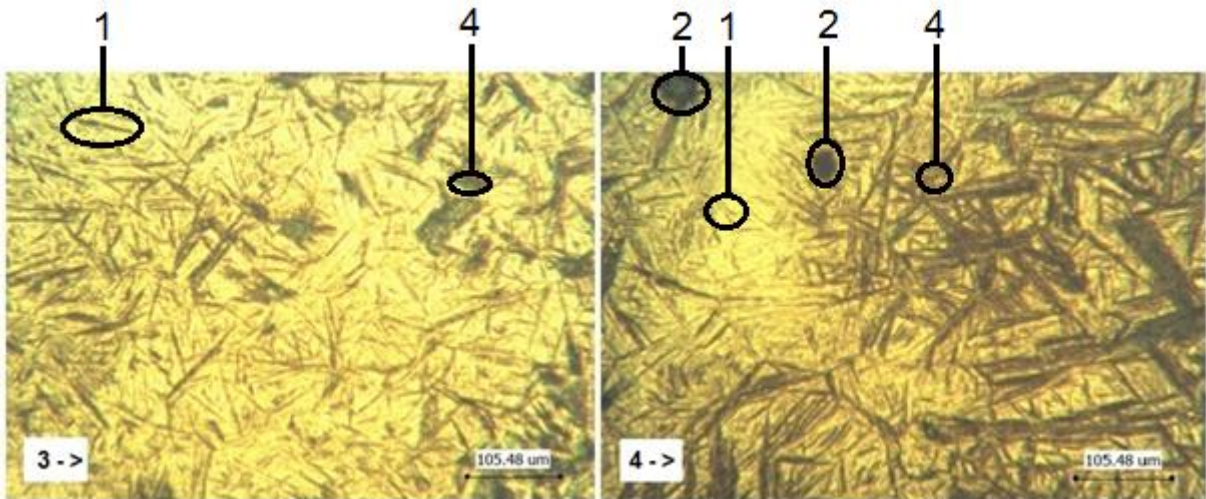
Figura 16 - Metalografias do aço SAE 4140, resfriamento em água, amostras “1->” e “2->”, ataque com ácido nítrico 2% aproximação 100X.



Fonte: Do autor.

A Figura 16 refere-se ao aço SAE 4140 e apresenta dois pontos de corte, sendo eles o “1->” e o “2->”, onde em “1->” consta na imagem metalográfica o constituinte martensita (1), em contato direto com a fonte resfriadora, enquanto em “2->” a metalografia corresponde também a presença de martensita (1), sendo sua superfície com uma distância de 15 mm da fonte resfriadora. A Figura 17 mostra as imagens metalográficas do aço SAE 4140 após ensaio Jominy nas posições 3 e 4 dos corpos de prova.

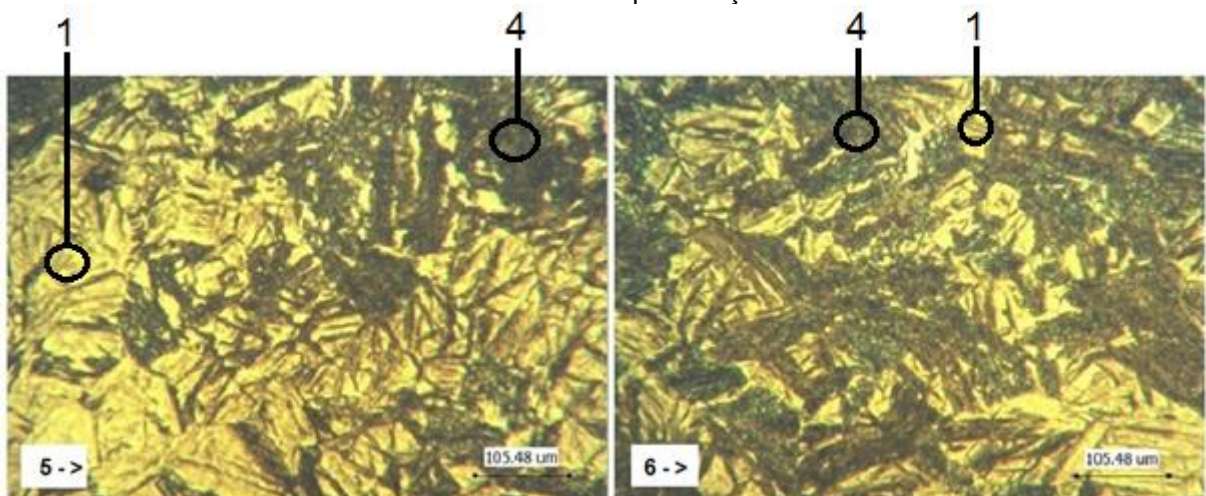
Figura 17 - Metalografias do aço SAE 4140, resfriamento em água, amostras “3->” e “4->”, ataque com ácido nítrico 2% aproximação 100X.



Fonte: Do autor.

A Figura 17 faz referência ao aço SAE 4140 e mostra dois pontos de corte, sendo eles o “3->” e o “4->”, onde em “3->” consiste a imagem metalográfica formada por martensita (1) e pequenos pontos de bainita (4), com sua superfície a uma distância de 23 mm da fonte resfriadora, já em “4->” a metalografia aborda uma distância de 31 mm da fonte resfriadora e a presença de bainita (4) e martensita (1) com uma quantidade maior de bainita do que no ponto “3->”. A Figura 18 mostra as imagens metalográficas do aço SAE 4140 após ensaio Jominy nas posições 5 e 6 dos corpos de prova.

Figura 18 - Metalografias do aço SAE 4140, resfriamento em água, amostras “5->” e “6->”, ataque com ácido nítrico 2% aproximação 100X.



Fonte: Do autor.

A Figura 18 trata do aço SAE 4140 e expõe dois pontos de corte, sendo eles o “5->” e o “6->”, onde em “5->” encontra-se na imagem metalográfica os constituintes martensita (1), bainita inferior (4), com sua superfície a uma distância de 39 mm da fonte resfriadora, ao passo que em “6->” a metalografia exhibe a presença dos constituintes martensita (1) e bainita superior (4), com uma distância de 47 mm da fonte resfriadora.

As imagens metalográficas expostas nesse capítulo, geradas a partir do ensaio Jominy, atestam que a profundidade de têmpera do aço SAE-1045 é menor se comparada com a profundidade de têmpera do aço SAE-4140. No aço SAE-1045 foi apresentada no ponto de corte “6->”, que é o ponto mais distante da fonte resfriadora, uma estrutura ferrítica com perlita grosseira, o que não ocorre com o aço SAE-4140, já que ele retrata a formação de martensita e bainita superior. Vale salientar que os constituintes ferrita e perlita do SAE-1045 possuem uma resistência mecânica menor quando comparados com os microconstituintes formados pelo SAE-4140, que são a martensita e a bainita inferior.

Ao compararmos os pontos “1->”, que é a face em contato com a fonte resfriadora em ambos os materiais, ambos formaram o microconstituente martensita, fazendo com que a dureza, no ponto “1->”, dos aços SAE-1045 e SAE-4140, seja similar à dureza na extremidade. Por outro lado, na comparação dos pontos “6->”, que estão a 47 mm de distância da fonte resfriadora, os dois apresentaram relevante diferença na dureza e microestrutura. No aço SAE-1045 foi evidenciado 22 HRC de dureza com uma microestrutura ferrita e perlita, e no aço SAE-4140 foram retratadas no ponto “6->” a dureza de 51 HRC e microestrutura martensita com bainita superior. Isso faz com que a resistência de uma engrenagem fabricada com o aço SAE-4140 seja maior que uma engrenagem fabricada com o aço SAE-1045. Trabalhos como o de Freitas (2010), Silva (2016) e Rios (2016) corroboram que os elementos de liga melhoram a resistência ao desgaste de um aço. Por este motivo, um material que possua uma maior dureza e uma metalografia com tendência maior para a formação de martensita ou bainita é mais indicado para a fabricação de engrenagens.

Apesar do valor de aço SAE-1045 fundido ser 40% menor em comparação ao aço SAE-4140 segundo o fabricante dos corpos de prova, dependendo da aplicação da engrenagem, se torna vantajoso fabricar a engrenagem em aço SAE-4140. A substituição do aço SAE-1045 pelo SAE-4140 é viável e mostra uma série de vantagens como a estabilidade de dureza e sua microestrutura constante devido a

presença de martensita em todas metalografias do aço SAE-4140, mas com um custo maior do material de 20%, assim vai depender das necessidades do cliente com relação a engrenagem fabricada.

7 CONCLUSÃO

A análise de composição química demonstra que o aço SAE-4140 possui elementos de liga como cromo e molibdênio em quantidade que acabam por influenciar a diferença de dureza entre os dois materiais. O aço SAE-1045, utilizado atualmente na fabricação das engrenagens fundidas, não possui esses elementos de liga, um dos fatores que impactam diretamente no custo do material de fundição.

O ensaio Jominy, apresentou para os aços SAE-1045 e SAE-4140 na extremidade temperada, posição “1->” do corpo de prova, uma dureza de 55 e 63 HRC respectivamente, considerada alta. Isso demonstra que, mesmo os teores de carbono sendo similares entre os materiais e na têmpera transformando a austenita em martensita grosseira para os dois casos, os elementos de liga presentes do aço SAE-4140 fazem com que a dureza seja maior em comparação ao aço SAE-1045.

Porém, esse efeito de temperabilidade, ou seja, a facilidade de formar martensita vai diminuindo a medida que se afasta da região de resfriamento direto. No ponto de corte “2->”, ou seja, a uma distância de 15 mm da extremidade temperada, a dureza do aço SAE-1045 diminui consideravelmente para 32 HRC, devido à microestrutura austenítica se decompor em perlita e ferrita. Já para o aço SAE-4140, no mesmo ponto, a 15 mm da extremidade temperada, praticamente manteve a dureza em torno de 61HRC e sua microestrutura apresentando alto percentual da martensita.

Assim, conforme vai se afastando da fonte resfriadora, a taxa de resfriamento diminui, ocasionando variações nas propriedades mecânicas dos aços em estudo, diminuindo a dureza e alterando as microestruturas. No caso do aço SAE-1045, foi encontrado uma grande quantidade de martensita somente na extremidade temperada. A medida em que a taxa de resfriamento diminui, a austenita se decompõe em ferrita e perlita ocasionando o crescimento dos grãos. Em uma distância de 47 mm da extremidade temperada, sendo assim, no ponto de corte “6->”, foram observados grãos grosseiros de perlita, o que explica a diminuição da dureza encontrada neste local.

No aço SAE-4140, ocorreu formação de martensita até a uma distância de 47 mm da extremidade temperada, último ponto analisado. Esta formação de martensita

contribuiu para a dureza encontrada ser maior em comparação à encontrada no aço SAE-1045, analisado na mesma posição.

De modo geral, os resultados mostram que a performance no ensaio de temperabilidade Jominy para o aço SAE-4140 é superior ao aço SAE-1045, devido à sua facilidade de manter o constituinte martensita ao longo do corpo de prova. Esse efeito é possível devido à presença de elementos de liga no material, tais como o cromo e molibdênio. Cabe salientar que com a perda de dureza a tendência será aumentar o desgaste da engrenagem.

Assim conclui-se que para a fundição de engrenagens, o aço fundido SAE-4140, terá um desempenho melhor em operação que o aço fundido SAE-1045, devido ao seu melhor equilíbrio micro estrutural martensítico. Entretanto, para uma engrenagem fabricada com qualquer um dos dois tipos de aço, deve ser revenido após a tempera, para que a sua estrutura não fique fragilizada. A presença de martensita, que é um constituinte metaestável que é formado em situações críticas de resfriamento, acaba por gerar tensões residuais elevadas nos aços, justificando um tratamento térmico pós têmpera.

8 PESQUISAS FUTURAS

Com base nas análises e resultados encontrados nesta pesquisa, pode-se considerar que a avaliação dos ensaios mecânicos de cada material, após tempera e revenido, será um fator relevante para definição de qual material utilizar nas engrenagens industriais.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM A148, Standard Specification for Steel Casting, High Strength, for Structural Purposes. In: Annual Book of ASTM Standards, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM A255, Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel. In: Annual Book of ASTM Standards, 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM A958, Standard Specification for Steel Castings, Carbon and Alloy, with Tensile Requirements, Chemical Requirements Similar to Standard Wrought Grades. In: Annual Book of ASTM Standards, 2000.

ASM HANDBOOK. (1990) Properties and selection: Irons, Steel and HighPerformance Alloys. 10ª ed. USA: ASM International.

AVNER, S. H., Introdução a la Metalurgia Física, McGraw-Hill, México, 1988.

BHADESHIA, H. K. D. H.; HONEYCOMBE, R. W. K.; Bainite in steels. 1ª ed; 1992, London, The Institute of Materials.

BORDINI, A. B. Tratamento térmico dos aços e carbonetos metálicos. Rio de Janeiro: SENAI. 1975.

CALLISTER JÚNIOR, W. D. (2013) Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 7ª ed. Utah: John Wiley & Sons.

CALLISTER JÚNIOR, W. D. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006. 589p.

CALLISTER JÚNIOR, W. D. Materials Science and Engineering an Introduction. Fourth Edition. United States, 1997.

CALLISTER JÚNIOR, W. D. Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Abordagem Integrada. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

CARDOSO, A. S. M. Caracterização mecânica e microestrutural dos aços SAE 4340 e 300M após soldagem a laser e tratamento superficial de nitretação a plasma. Dissertação (Mestrado em Engenharia dos Materiais). Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de Lorena, Lorena. 2011.

CASTRO, D. B. V. Influência da temperatura de austenitização para têmpera e de revenimento na tenacidade e na vida em fadiga do aço SAE 5160 com diferentes teores de fósforo. São Carlos: USP, 2007.

CENTRO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO EM AÇO. Aços Estruturais. Rio de Janeiro. CBCA. 2014. Disponível em: <<http://www.cbca-acobrasil.org.br/construcao-em-acoacos-estruturais.php>>. Acesso em: jan. 2020.

CHIAVERINI, V., Aços e Ferros Fundidos. 5a ed. ABM, São Paulo, 1984.

CHIAVERINI, V. Aços e Ferros Fundidos. 7ª edição. São Paulo: Publicação ABM (Associação Brasileira de Metais), 2005.

COLPAERT, H. Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008.

DE SOUSA, E. C. Estudo da Oxidação do Óleo de Soja com diferentes concentrações de Aditivos Antioxidantes, para uso em Tratamentos Térmicos de Têmpera. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais. Escola de Engenharia de São Carlos, 2007.

DUBIELA, L.B. Construção de equipamentos de ensaios de temperabilidade do tipo jominy empregando o aço SAE 150 como objeto de estudo. Londrina: UTFPR, 2016.

ECHEVERRI, E. A. A. Análise numérica e experimental das tensões residuais geradas durante o processo de têmpera de cilindros de aço AISI 1045, 4140 e 4340. 185f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Universidade de São Paulo, São Paulo. 2012.

FREITAS, W. F. de. Avaliação das Propriedades Mecânicas e Resistência à Fadiga do Aço AISI 4140 Submetido a Diferentes Valores de Temperatura de Revenimento. 2010. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

HONEYCOMBE, R. W. K, BHADESHIA H. K. D. H. Steel - Microstructure and Properties. 2. ed. New York: Arnold, 1980.

HONEYCOMBE, R. W. K.; et. Al. Steels Microstructure and Properties. 3ª ed. Elsevier. Oxford. 344 p. 2006.

KRAUSS, G. Steels: Heat treatment and processing principles. Ohio: ASM International, 1994.

KRAUSS, G. Steels: heat treatment and processing principles. 6. ed. Ohio: ASM International, 2000. 497p.

KRAUSS, G. Steels: Heat treatment and processing Principles. 4 Ohio, ASM International, 1995.

LESSA, C. R. L. Soldagem FHPP – Processo e Metalurgia nas Transformações das Fases de um aço C-Mn. Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2011.

LIMA, F. B. Microestrutura e Tenacidade de Aços de Baixa Liga Tipo 41XX - Uma Abordagem Quantitativa. 2006. 188 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

LLEWELLYN D., HUDD R. Steels: Metallurgy and Applications. Third Edition. Butterworth – Heynemann. Madras. India. 2004.

LOPES, M. M. B.; COTA, A. B. A study of isochronal austenitization kinetics in a low carbon steel. REM: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, Metallurgy and materials, 2014, p61-66.

MARTINS, M. Temperabilidade Jominy e Influência do Revenido Sobre a Dureza - Um Estudo em Aços Estruturais Nacionais. 2002. 103 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

METALS HANDBOOK, 8ª edição, vol. 8, Metalografia, Estruturas e diagramas de fase, a American Society for Metals, Materials Park, OH, 1973.

METALS HANDBOOK. Heat Treating of Steels. 10ed. Ohio: American Society for Metals, v.4, 1991.

NUNURA C. Correlação numérico-experimental da microestrutura, taxa de resfriamento e características mecânicas do aço ABNT 1045. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. 2009.

OLIVEIRA, C. S.; DENTI, G. B. Avaliação da tenacidade ao impacto da região revenida pelo passe duplo em soldagem swaw do aço AISI 1045. 2007. Disponível em: <https://mecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/2007-1_claudia_santos_de_oliveira.pdf>. Acesso em: 28 de fevereiro de 2021.

PANNONI, Fabio Domingos. Aços Estruturais. Açominas, 2001. Artigo técnico, disponível em: <http://www.acominas.com.br/upload/produtos/perfis/caracteristicatecnicapf/artigostecnicos/geral_1.pdf>.

PERINI, Paulo Roberto. Fundação. Florianópolis: Escola técnica federal de santa catarina, 1980.

PIRES, R. R., Efeitos da Geometria, da Força Axial e da Rotação no Reparo por Atrito. Dissertação. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2007.

RASMA. E. T. Caracterização Estrutural e Mecânica do Aço AISI/SAE 4140 Tratado Sob Diferentes Tratamentos. Dissertação. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, 2015.

RAUTER, Raul Oscar. Aços Ferramentas – seleção, tratamentos térmicos, pesquisa de defeitos. 1ª ed., Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos, 1974.

REED-HILL, R. E. Princípios de metalurgia física. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982. 776p.

REED-HILL, R. E.; Physical Metallurgy Principles. Boston, Mass, 3ª ed, 1994.

RIOS, T. C Influência de tratamentos térmicos na microestrutura e propriedades mecânicas do aço SAE 4140: Santo André: UFABC, 2016.

ROCHA, M. A. C. Análise das propriedades Mecânicas do aço SAE 4140 com estrutura Bifásica. Dissertação de Mestrado. 2004.

SANTOS, C. N. Aspectos cristalográficos da transformação martensítica de uma liga Fe-27%Ni, Tese (Doutorado) – Instituto Militar de Engenharia – Rio de Janeiro. 2008.

SCHEIDEMANTEL, H.R. Utilização de métodos teóricos para a avaliação de temperabilidade jominy de aços com diferentes composições químicas. Rio de Janeiro: UFRJ, 2014.

SILVA, A. L. V. da C.; MEI, P. R. Aços e Ligas Especiais. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

SILVA, A.L.C.; MEI, P.R. Aços e ligas especiais. 2a ed, eletrometal aços especiais, 1988, 528 p

SILVA, M. C. A. Tratamento térmico de tempera no aço SAE 1040 em diferentes meios de revenimento. Marabá: UNIFESSPA, 2016.

SILVA, S. E. T. P. Análise das Propriedades Mecânicas e Estruturais do Aço SAE 4140 Submetido a Tratamento Criogênico. Dissertação de Mestrado. UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF, 2012.

SMITH, Y. E. et al. Quenching of Steel. ASM Handbook: Heat Treating (prepared by the ASM Committee on Quenching of Steel): EUA, 1991.

SOUZA, Augusto Sérgio de. Composição Química dos Aços. 2ª ed. Editora Edgard Blücher, 2012.

SPEER, J. G. Aços Avançados de Alta Resistência para Aplicações Automotiva: O Processo “Têmpera e Partição” Promete Alta Resistência e Alongamento. Caderno Técnico Metalurgia e Materiais, USP, p. 103-105, 2005.

TEDESCO, Marcelo Evandro. Variação Dimensional e Microestrutural do Aço AISI 4140 em Peças Usinadas por Torneamento. Orientador: Rodrigo Panosso Zeilmann. 2007. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós Graduação em Materiais) - Universidade de Caxias do Sul, RS, 2007.

THEWLI, G.; Classification and quantification of microstructures in steels. Journal Materials Science and Technology. Vol. 20, pages 143-160, February, 2004.

TRINDADE, Denisson R. et al. Estudo e avaliação do tempo de permanência a temperatura no tratamento térmico de têmpera do aço SAE 1045. 2017. Disponível em:

<http://ojs.rpqsenai.org.br/index.php/rpq_n1/article/download/395/384#:~:text=Com%20a%20inten%C3%A7%C3%A3o%20de%20se,recozimento%2C%20t%C3%AAmpera%20e%20revenimento6.>. Acesso em: 28 de fevereiro de 2021.

VALE, A. R. M. do. Tratamento térmico. Santa Maria: UFSM, 2011. Disponível em: http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos/ifpa/tecnico_metalurgica/tratamento_termico.pdf>. Acesso em: fev. 2020.

VAN VLACK, L. H. Princípios de Ciência e Tecnologia dos Materiais. 2. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1994.

VOORT, G.F.V. Atlas of time temperature diagrams. USA: ASM International, 1^a ed, 1991.

XAVIER, Carlos Roberto et al. Projeto e Construção do Aparato Jominy: Uma Contribuição para a Pesquisa no UniFOA. Cadernos UniFOA, 4., 2009, Volta Redonda - RJ.

YI, H.L. Review on δ -Transformation-Induced Plasticity (TRIP) Steels with Low Density: The Concept and Current Progress. JOM. 2014, Vol. 66.