



UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E SUDESTE DO PARÁ

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E ENGENHARIAS

FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

JOSÉ CHARLES MORAES DE OLIVEIRA

**LEVANTAMENTO DA CURVA DE TEMPERABILIDADE E
CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA DO AÇO SAE 1140**

MARABÁ

2014

JOSÉ CHARLES MORAES DE OLIVEIRA

**LEVANTAMENTO DA CURVA DE TEMPERABILIDADE E
CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA DO AÇO SAE 1140**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais, Instituto de Geociências e Engenharias, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará. Orientador: Prof. Esp. Márcio Paulo de Araújo Mafra.

MARABÁ

2014

Dados Internacionais de catalogação na publicação (CIP)
Biblioteca II da UNIFESSPA, CAMAR, Marabá, PA

Oliveira, José Charles Moraes de

Levantamento da curva de temperabilidade e caracterização metalográfica do aço SAE 1140 / José Charles Moraes de Oliveira; orientador, Márcio Paulo de Araújo Mafra – 2014.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Campus Universitário de Marabá, Instituto de Geociências e Engenharias, Faculdade de Engenharia de Materiais, Curso de Engenharia de Materiais, Marabá, 2014.

1. Aço – Tratamento térmico. 2. Aço – Metalurgia. I. Mafra, Márcio Paulo de Araújo, orient. II. Título.

CDD: 23. ed.: 620.17

JOSÉ CHARLES MORAES DE OLIVEIRA

**LEVANTAMENTO DA CURVA DE TEMPERABILIDADE E
CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA DO AÇO SAE 1140**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Materiais,
Instituto de Geociências e Engenharias,
Universidade Federal do Sul e Sudeste do
Pará. Orientador: Prof. Esp. Márcio Paulo de
Araújo Mafra.

Data de aprovação: 23 de Dezembro de 2014.

Conceito: EXCELENTE

Banca examinadora:

_____ - Orientador

Prof. Esp. Márcio Paulo de Araújo Mafra – FEMAT/Unifesspa

_____ - Membro interno

Prof. Dr. Elias Fagury Neto – Unifesspa

_____ - Membro interno

Prof. Carlos Vinicius de Paes Santos – Unifesspa

Ao meu filho, Lucas Alexandre!

AGRADECIMENTOS

A minha mãe, Lucia, pelo incentivo e apoio dedicado nessa jornada e em toda minha vida.

Aos amigos que incentivaram a concluir essa etapa acadêmica, em especial Marcinato Macedo.

Ao meu orientador, professor Márcio Mafra, pelo apoio acadêmico.

A todos os professores que contribuíram para minha formação profissional.

Aos colaboradores da universidade, que tiveram paciência e disponibilidade para me ajudar em alguns trabalhos, em especial a Tatiani.

A empresa Sinobrás, na pessoa do Wemerson Souto, por fornecer o material para realização deste trabalho.

Aos colegas Antônio Charles e Torben Carvalho pelo auxílio prestados na caracterização metalográfica e nos procedimentos dos ensaios.

Aos colegas Jailes Moura, José Salomão e Raylison Bruno por deixarem eu ganhar na sinuca, sem que estes tenham matado uma única bola.

E a todos os colegas do curso de engenharia de materiais, que contribuíram para o crescimento pessoal e profissional, em especial Fernanda Simões e Karllen Camila.

"Ninguém pode ser escravo de sua identidade, quando surge uma possibilidade de mudança é preciso mudar."

Elliot Gould

RESUMO

A têmpera é um dos tratamentos térmicos mais importantes dos aços, no qual provocam intensas modificações estruturais, aumentando a dureza destes. Neste trabalho, foi construída a curva de temperabilidade do aço SAE 1140, ainda inexistente na literatura, sendo utilizado o ensaio Jominy seguindo a norma NBR 6339/89 da ABNT, e a caracterização do aço através de microscopia ótica, possibilitando a visualização da microestrutura modificada responsável pelo aumento significativo da dureza resultante no material ensaiado. Foi alcançado um aumento de 194,9% na dureza do metal ensaiado e a caracterização metalográfica revelou microestruturas diferentes antes e pós o tratamento térmico.

Palavras-Chaves: Aços, temperabilidade, Jominy, martensita.

ABSTRACT

Quenching is one of the most important heat treatments of steels, which cause intense structural changes, increasing the hardness thereof. In this work, it was built the hardenability curve of SAE 1140 steel, still lacking in the literature, being used the Jominy test following the ABNT NBR 6339/89, and the characterization of steel by optical microscopy, enabling the visualization the modified microstructure responsible for the significant increase in hardness resulting in the tested material. Was reached an increase of 194,9% in the hardness of the tested metal, and metallographic characterization showed different microstructures before and after heat treatment.

Keywords: Steel, hardenability, Jominy, martensite.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama ferro carbono.	21
Figura 2 – Faixas de temperatura recomendadas para o tratamento térmico dos aços.....	23
Figura 3 – Curva de dureza de um aço SAE 1090 obtida pelo método Grossmann.	24
Figura 4 – Dispositivo Jominy.....	25
Figura 5 – Dureza versus distância do corpo de prova.	26
Figura 6 – Influência da orientação da seção em relação à anisotropia das inclusões não-metálicas em produtos conformados a quente.....	31
Figura 7 – Fluxograma.	35
Figura 8 – Desenho do corpo de prova, dimensões em mm.....	36
Figura 9 – Corpos de prova para realizar ensaio Jominy.	37
Figura 10 – a) dispositivo Jominy, b) temperatura de austenitização, c) CP's austenitizados.	37
Figura 11 – Corpo de prova sendo ensaiado.	38
Figura 12 – Corpo de prova retificado e posições de medição ao longo do seu comprimento a partir da extremidade temperada. Dimensões em milímetro.	39
Figura 13 – Durômetro.	39
Figura 14 – Medida da dureza transversal.	41
Figura 15 – Curva de temperabilidade do aço SAE 1140.	42
Figura 16 – Micrografia do aço SAE 1140 antes da têmpera. Aumento a) 150x; b) 300x; c) 750x; d) 1500x.....	43
Figura 17 – Micrografia do aço SAE 1140 após a têmpera. Aumento a) 300x; b)750x; c) 1500x.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Efeitos dos elementos de liga nos aços.	17
Tabela 2 – Classificação dos aços pela ABNT.....	18
Tabela 3 – Aços ressulfurados.	19
Tabela 4 – Valores típicos de H.	22
Tabela 5 – Características das escalas de Dureza Rockwell.	27
Tabela 6 – Tipos de ataque químico.	32
Tabela 7 – Composição química do aço SAE 1140.	36
Tabela 8 – Médias das durezas.	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Unifesspa	Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará
FEMAT	Faculdade de Engenharia de Materiais
SAE	Society Automotive Engineers
TTT	Tempo – Temperatura – Transformação
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
DIN	Deutsches Institut für Normung
Dc	Diâmetro crítico
Fe	Ferro (Elemento químico)
C	Carbono (Elemento químico)
P	Fósforo (elemento químico)
S	Enxofre (elemento químico)
Mn	Manganês (elemento químico)
W	Tungstênio (elemento químico)
CP	Corpo de Prova
Si	Silício (elemento químico)
Cr	Cromo (elemento químico)
Mo	Molibdênio (elemento químico)
Ni	Níquel (elemento químico)
V	Vanádio (elemento químico)
H	Severidade da têmpera
Cu	Cobre (elemento químico)
F	Flúor (elemento químico)
Nb	Nióbio (elemento químico)
Sn	Estanho (elemento químico)
HRC	Dureza Rockwell C
EPI	Equipamentos de Proteção Individual
Temp.	Temperabilidade
Fe ₃ C	Cementita
kgf	Quilograma-força

MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MET	Microscopia Eletrônica de Transmissão
mm	milímetro
μm	micrometro
mL	mililitro
HNO_3	ácido nítrico
Etanol	álcool etílico
SiC	carboneto de silício

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS.....	15
1.1.1	Objetivos gerais	15
1.1.2	Objetivos específicos	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	AÇOS.....	16
2.1.1	Aço SAE 1140	18
2.2	TRATAMENTO TÉRMICO DOS AÇOS.....	19
2.3	TÊMPERA	20
2.3.1	Velocidade de resfriamento	21
2.3.2	Tempo de permanência à temperatura austenítica	22
2.3.3	Temperabilidade dos aços	22
2.4	ENSAIOS DE TEMPERABILIDADE DOS AÇOS	24
2.4.1	Ensaio Grossmann	24
2.4.2	Ensaio Jominy	25
2.4.3	Ensaio de Dureza Rockwell	27
2.5	CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA	28
2.5.1	Macrográfico	28
2.5.2	Micrográfico	29
2.5.3	Etapas para realizar a Caracterização Metalográfica	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1	MATERIAIS	34
3.2	METODOLOGIA	35
3.2.1	Obtenção e preparação de amostras	36
3.2.2	Ensaio Jominy	37
3.2.3	Análise da dureza	39
3.2.4	Análise metalográfica	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1	ENSAIO JOMINY PARA O AÇO SAE 1140	41
4.2	METALOGRAFIA.....	43
5	CONCLUSÕES	45
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	46
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

1 INTRODUÇÃO

A produção de aço é um forte indicador do estágio de desenvolvimento econômico de um país. Seu consumo cresce proporcionalmente à construção de edifícios, execução de obras públicas, instalação de meios de comunicação e produção de equipamentos. Esses materiais já se tornaram corriqueiros no cotidiano, mas fabricá-los exige técnica que deve ser renovada de forma cíclica, por isso o investimento constante das siderúrgicas em pesquisa [1].

O aço SAE 1140 é um aço com teor médio de carbono (0,37% - 0,44%p C), resulfurado e de fácil usinagem [2, 3]. Os aços resulfurados são aplicáveis a produtos semiacabados para forjamento, barras laminadas a quente, acabados a frio, fio-máquina e tubos sem costura [4]. Tal porcentagem de carbono viabiliza o tratamento térmico de têmpera, pois apresenta um teor maior que 0,3%p C. Abaixo deste teor, o efeito endurecedor provocado pela têmpera seria muito pequeno [5].

O objetivo fundamental da têmpera das ligas ferro-carbono é obter uma estrutura martensítica, mediante ao resfriamento rápido. O aço é aquecido acima de sua zona crítica durante o tempo necessário, seguido de resfriamento rápido em um meio como a água, óleo ou salmoura [6]. Chama-se temperabilidade a capacidade do aço endurecer ou a profundidade de endurecimento; também deve ser ligada igualmente à obtenção da máxima tenacidade, em função da microestrutura produzida no esfriamento [7].

A combinação de composição química e estrutura é responsável pela definição das propriedades de um aço. A caracterização da composição química é feita através de vários métodos de análise química. Já as técnicas metalográficas aplicam-se à caracterização da estrutura, em escala macro e microscópica [8].

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 **Objetivos gerais**

- Levantar a curva de temperabilidade do aço, utilizando o método de Jominy.
- Realizar a análise metalográfica do aço antes e depois do ensaio.

1.1.2 **Objetivos específicos**

- Avaliar dureza antes e após o ensaio;
- Comparar a dureza do aço antes e depois do tratamento térmico.
- Analisar a microestrutura antes e depois do tratamento;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AÇOS

Segundo Chiaverini (2012), aço é uma liga ferro-carbono contendo geralmente 0,008% até, aproximadamente, 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais, tais como enxofre e fósforo, resultantes dos processos de fabricação. O aço é uma liga metálica de natureza relativamente complexa e sua definição não é simples a rigor os aços comerciais não são ligas binárias, apesar de seus principais elementos de liga serem o ferro e o carbono, eles contêm sempre outros elementos secundários, presentes na estrutura devido aos processos de fabricação.

Fora o carbono vários elementos químicos podem estar presentes na composição do aço. Quando elementos não são adicionados deliberadamente, são chamados de residuais. Já para os elementos adicionados ao aço visando afetar seu comportamento são chamados de elementos de liga [8].

A combinação de composição química e estrutura é responsável pela definição das propriedades de um aço. A caracterização da composição química é feita através de diversos métodos e técnicas de análise química.

No aço o limite inferior (0,008%) corresponde à máxima solubilidade de carbono no ferro à temperatura ambiente e o limite superior (2,11%) corresponde à máxima quantidade de carbono que se dissolve no ferro e ocorre a 1148°C.

Essa quantidade máxima depende da presença ou não de elementos de liga ou da presença dos elementos residuais em teores superiores aos normais. Nestas condições é necessário considerar dois tipos fundamentais de aço para se ter uma definição mais precisa:

- Aço-carbono ou liga de ferro-carbono contendo geralmente 0,008% até cerca de 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais resultantes dos processos de fabricação;
- Aço-liga ou aço-carbono que contém outros elementos de liga ou que contém elementos residuais em teores acima dos considerado normal [2, 7].

Os aços possuem diversas aplicações tais como na fabricação de peça por fundição, trilhos, tubos, arames, fios, molas, chapas para estruturas em geral, entre

outras aplicações. Geralmente a classificação dos aços é realizada pela ABNT (brasileira); SAE, AISI e ASTM (americanas); DIN (alemã) entre outras.

Os aços-liga constituem o mais importante grupo de materiais utilizados na engenharia e na indústria. De fato, as propriedades mecânicas desses aços variam de acordo com os outros elementos constituintes, tornando importantes os estudos que identifiquem o efeito destes elementos para atender a maioria das aplicações práticas.

Os aços-carbono podem ser subdivididos conforme o teor de carbono presente na estrutura:

- Aços de baixo teor de carbono (quantidade de carbono inferior a 0,25%);
- Aços de médio teor de carbono (quantidade de carbono entre 0,25% e 0,6%);
- Aços de alto teor de carbono (quantidade de carbono superior a 0,6%).

Já os aços-liga constituem outros elementos de liga ou apresentam os elementos residuais em teores acima dos que são considerados normais.

Os aços-liga, por sua vez, podem ser subdivididos conforme o teor dos elementos residuais:

- Aços de baixo teor de ligas, com elementos de liga abaixo de 8%;
- Aços de alto teor de ligas, com elementos de liga acima de 8% [7].

Todas as propriedades físicas e mecânicas do aço são obtidas através de tratamentos térmicos ou trabalhos mecânicos pela modificação da sua microestrutura, variando conforme o teor dos componentes.

A Tabela 1 mostra os efeitos dos elementos de liga nos aços e seus respectivos resultados.

Tabela 1 – Efeitos dos elementos de liga nos aços.

Efeito	Resultado
C	Dureza
Si 0,15% a 0,20%	Desoxidante
Mn 0,30% a 0,60%	Desoxidante e dessulfurante
F e S	Elementos nocivos
Ni	Resistência a corrosão e refino de grão
Cu	Resistência a corrosão atmosférica
Cr	Resistência ao desgaste
Mo	Temperaturas elevadas

Fonte: [5]

Já Tabela 2 mostra as principais famílias de aços conforme classificados pela ABNT (similar a AISI e SAE).

Tabela 2 – Classificação dos aços pela ABNT.

Classe	Designação / limites em % de peso
	Aços Carbono
10xx	Aço carbono
11xx	Aço carbono resulfurado
12xx	Aço carbono resulfurado e refosforado
	Aços Ligados
13xx	Mn 1,75%
23xx	Ni 3,5%
25xx	Ni 5,0%
31xx	Ni 1,25%, Cr 0,65%
33xx	Ni 3,50%, Cr 1,55%
40xx	Mo 0,25%
41xx	Cr 0,50% ou 0,95%, Mo 1,12% ou 0,20%
43xx	Ni 1,80%, Cr 0,50% ou 0,80%, Mo 0,25%
46xx	Ni 1,55% ou 1,80%, Mo 0,20% ou 0,25%
47xx	Ni 1,05%, Cr 0,45%, Mo 0,20%
48xx	Ni 3,50%, Mo 0,25%
50xx	Cr 0,80% ou 0,40%
51xx	Cr 0,80% a 1,05%
5xxxx	Cr 0,50% ou 1,00% ou 1,45% m C 1,00%
61xx	Cr 0,80% ou 0,95%, V 0,10% ou 0,15% mínimo
72xx	W 1,75%, Cr 0,75
86xx	Ni 0,55%, Cr 0,50% ou 0,65%, Mo 0,20%
87xx	Ni 0,55%, Cr 0,50%, Mo 0,25%
92xx	Mn 0,85%, Si 2,00%
93xx	Ni 3,25%, Cr 1,20%, Mo 0,12%
98xx	Ni 1,00%, Cr 0,80%, Mo 0,25%

Fonte: [15]

2.1.1 Aço SAE 1140

Pertencendo a classe de aço de médio teor de carbono, o aço SAE 1140 do tipo 11xx, também chamados de aços resulfurados, se caracterizam pela presença de enxofre em sua composição acima do que é encontrado em outros tipos de aço. Em condições normais o enxofre é extremamente prejudicial ao aço, tornando-o quebradiço, porém a adição de manganês no metal promove a formação do sulfeto de manganês, que tem por característica promover a quebra do cavaco (resíduos

retirados da peça durante a usinagem) mais facilmente. A utilização do manganês nos aços resulfurados tem dupla ação positiva, facilita a usinagem, aumentando a vida útil da ferramenta, acelerando o processo de fabricação, e diminui consideravelmente os efeitos nocivos do enxofre no material, dando mais tenacidade ao mesmo.

A presença de enxofre mesmo ligado ao manganês ainda guarda efeitos nocivos, como o desgaste das ferramentas feitas com esse material e a baixa conformabilidade a quente e também suscetibilidade a corrosão. Os problemas são tanto mais sérios quanto maior o teor de enxofre. De um modo geral, um aço deve possuir menos de 0,04% de enxofre [14]. A Tabela 3 mostra a relação dos principais aços resulfurados e suas faixas de composição química.

Tabela 3 – Aços resulfurados.

Designação AISI-SAE	Composição %		
	C	Mn	S
1110	0,08-0,03	0,30-0,60	0,08-0,13
1117	0,14-0,20	1,00-1,30	0,08-0,13
1118	0,14-0,20	1,30-1,60	0,08-0,13
1137	0,32-0,29	1,35-1,65	0,08-0,13
1139	0,35-0,43	1,35-1,65	0,13-0,20
1140	0,37-0,44	0,70-1,00	0,08-0,13
1141	0,37-0,45	1,35-1,65	0,08-0,13
1144	0,40-0,48	1,35-1,65	0,24-0,33
1146	0,42-0,49	0,70-1,00	0,08-0,13
1151	0,48-0,55	0,70-1,00	0,08-0,13

Fonte: [4]

2.2 TRATAMENTO TÉRMICO DOS AÇOS

As transformações da austenita que podem ocorrer quando o aço é resfriado a determinadas temperaturas, abaixo da linha de transformação A_1 e ali mantido a temperaturas constantes de modo a poder-se verificar o tempo necessário para que a transformação inicie e termine.

Aumentando a velocidade de resfriamento altera as condições de equilíbrio do diagrama Fe-C e as condições de formação dos constituintes normais resultantes da transformação da austenita.

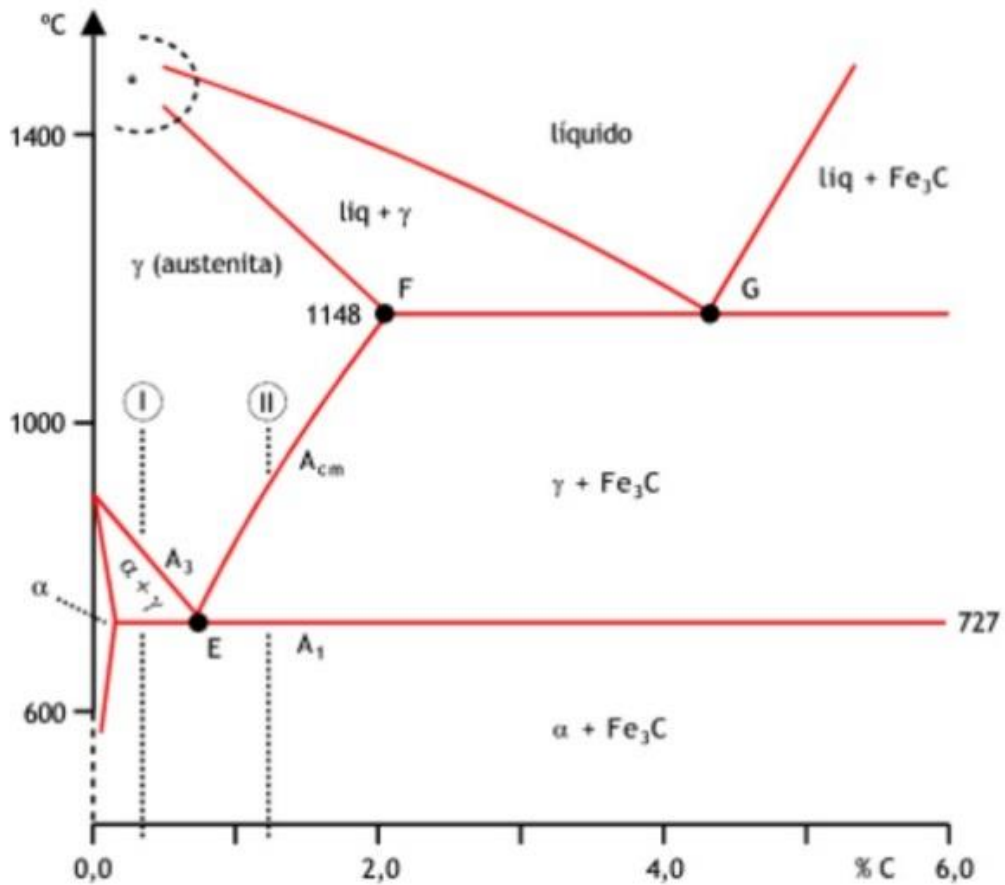
Os microconstituintes resultantes de um aumento da velocidade de resfriamento adquirem aspectos diferentes: inicialmente, eles apresentam granulação mais fina, com características próprias e que afetam as propriedades dos aços. Com o aumento da velocidade de resfriamento surge um novo microconstituente – a martensita – de estrutura cristalina totalmente diferente e de propriedade totalmente nova [9].

2.3 TÊMPERA

É o tratamento térmico mais importante dos aços, principalmente os que são utilizados em construção mecânica. Uma das características mais importantes dos aços como materiais é a possibilidade de desenvolver combinações ótimas de resistência e tenacidade. A têmpera corresponde a uma velocidade suficientemente rápida, ou seja, indica um tratamento visando a formação da estrutura metaestável martensítica. O tratamento de têmpera consiste basicamente em [8, 11]:

- a) Aquecer até a temperatura adequada para obter uma microestrutura austenítica, acima da temperatura crítica A3, conforme Figura 1;
- b) Manter a peça nesse patamar de temperatura por um tempo adequado;
- c) Resfriar em um meio que resulte em velocidade apropriada para obter a formação de martensita.

Figura 1 – Diagrama ferro carbono.



Fonte: [12]

Após a têmpera a distribuição de dureza ao longo da seção em uma peça dependem da temperabilidade do aço, do tamanho e forma da peça, da temperatura de austenização e do meio de têmpera. Carbonetação e decarbonetação têm grande efeito na resistência à fadiga térmica da superfície das ferramentas, devendo ser evitadas.

2.3.1 Velocidade de resfriamento

Quanto maior a velocidade de resfriamento do meio, maior a sua severidade, ou seja, maior será a formação de martensita na peça, podendo até mesmo resultar em trincas e empenamentos [9, 11]. E para medir a severidade da têmpera costuma

ser indicado pela letra “H”, tomando como base a água a 18°C e representando H=1. Aos outros meios utilizamos outros valores, conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Valores típicos de H.

Estado de agitação Meio de resfriamento	Óleo	Água	Salmoura
Nenhuma	0,25 a 0,30	1,00	2,2
Pouca	0,30 a 0,35	1,00 a 1,10	2,2 a 2,2
Moderada	0,35 a 0,40	1,20 a 1,30	-
Boa	0,40 a 0,50	1,40 a 1,50	-
Forte	0,50 a 0,80	1,60 a 2,00	-
Violenta	0,80 a 1,10	4,00	5,0

Fonte: (9)

O resfriamento é o fator mais importante no tratamento térmico, pois ele que determinará efetivamente a estrutura e as propriedades finais dos aços [7].

2.3.2 Tempo de permanência à temperatura austenítica

Este parâmetro tem influência direta no tratamento, pois quanto mais longo o tempo à temperatura considerada de austenitização, maior o tamanho de grão resultante. Tempo muito longo pode aumentar a oxidação ou descarbonetação do material [7, 9].

2.3.3 Temperabilidade dos aços

O conceito de temperabilidade é associado à capacidade de endurecimento do aço durante o resfriamento rápido (têmpera), ou seja, a sua capacidade de formar martensita a uma determinada profundidade (ou distância da extremidade) da peça.

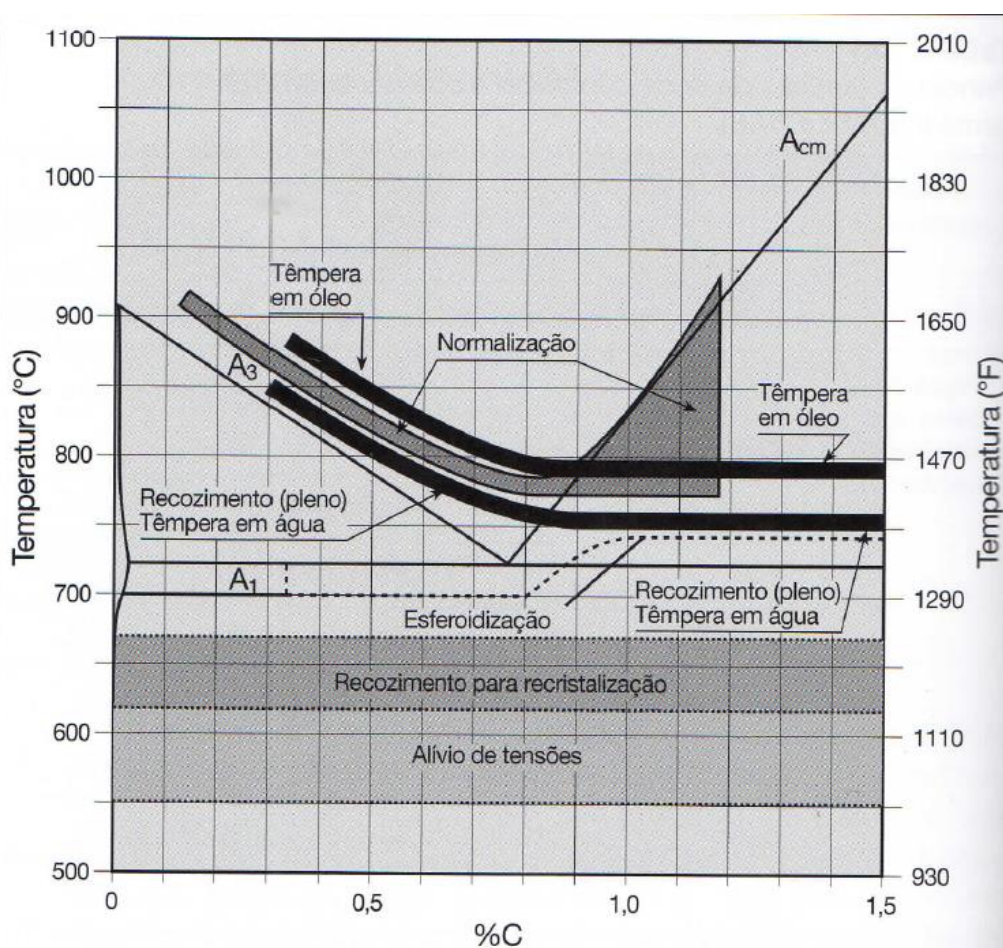
A profundidade de endurecimento depende mais do tamanho do grão austenítico e da presença dos elementos de liga, do que do teor de carbono do aço

[5, 8]. Os elementos de liga estabilizadores da austenita são: Molibdênio e Níquel, estes aumentam o campo austenítico e favorece a temperabilidade dos aços.

A Figura 2 mostra a faixa de temperatura recomendada para o tratamento térmico de aços ao carbono, superpostas ao diagrama de equilíbrio de fases metaestável Fe-C.

Enquanto o carbono tem um forte efeito sobre a dureza da martensita, a maior parte dos elementos de liga adicionados ao aço retarda as transformações de decomposição difusional da austenita, aumentando a temperabilidade.

Figura 2 – Faixas de temperatura recomendadas para o tratamento térmico dos aços.



Fonte: [8]

A temperatura de austenitização dos aços hipo-eutetóides está diretamente associada à linha A₃ do diagrama de equilíbrio de fases do aço. O aço apresentará menor temperatura de austenitização quanto maior for o teor de carbono.

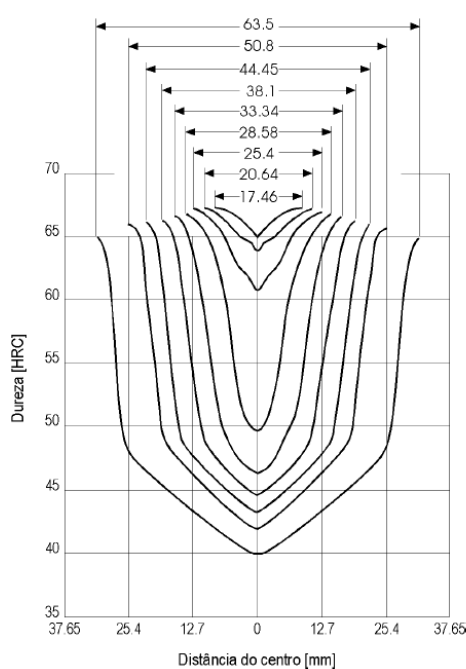
2.4 ENSAIOS DE TEMPERABILIDADE DOS AÇOS

Dois métodos importantes foram estabelecidos para a medida e quantificação da temperabilidade dos aços: o método Jominy e o método do diâmetro crítico de Grossmann. O método de Jominy é o mais simples e o mais comumente empregado, haja visto que, é o menos oneroso.

2.4.1 Ensaio Grossmann

Este método envolve austenitizar barras de diâmetros crescente e resfriá-las rapidamente, em condições controladas de resfriamento, para determinar o diâmetro em que se obtém 50% de martensita no centro da barra [8, 9]. Devido à dificuldade de conseguir uma microestrutura martensítica total em toda a seção, costuma-se considerar adequada a endurecibilidade de um aço quando seu centro apresentar 50% de martensita, podendo ser definido como “diâmetro crítico D_c ”. Portanto, quanto maior o D_c maior será a temperabilidade do aço.

Figura 3 – Curva de dureza de um aço SAE 1090 obtida pelo método Grossmann.



Fonte: [9]

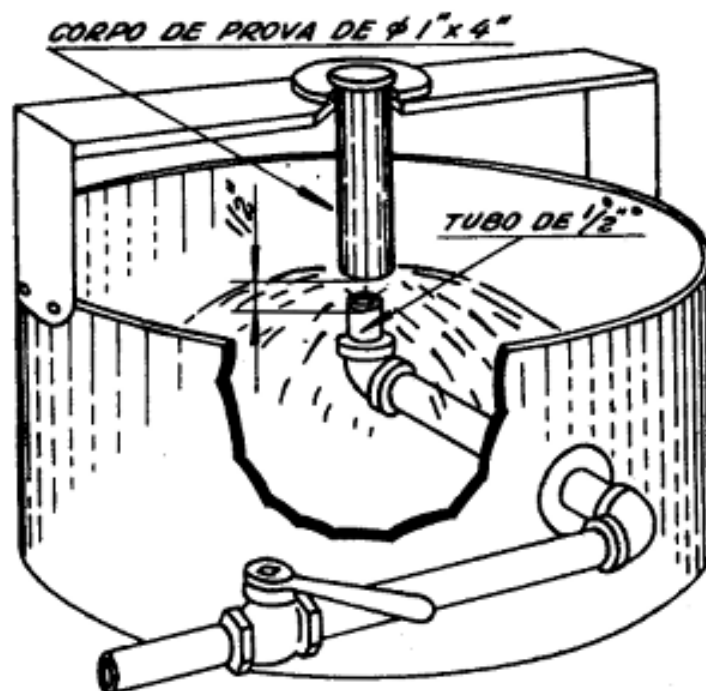
Pelo método de Grossmann pode-se calcular o efeito do meio de têmpera, medido através do fator H, também conhecido como severidade de têmpera.

Uma grande desvantagem deste método é a quantidade muito grande de corpos de prova à serem ensaiados para obter a média de dureza entre eles e a posterior levantamento das curvas unitárias, tornando muito caro esse processo [13].

2.4.2 Ensaio Jominy

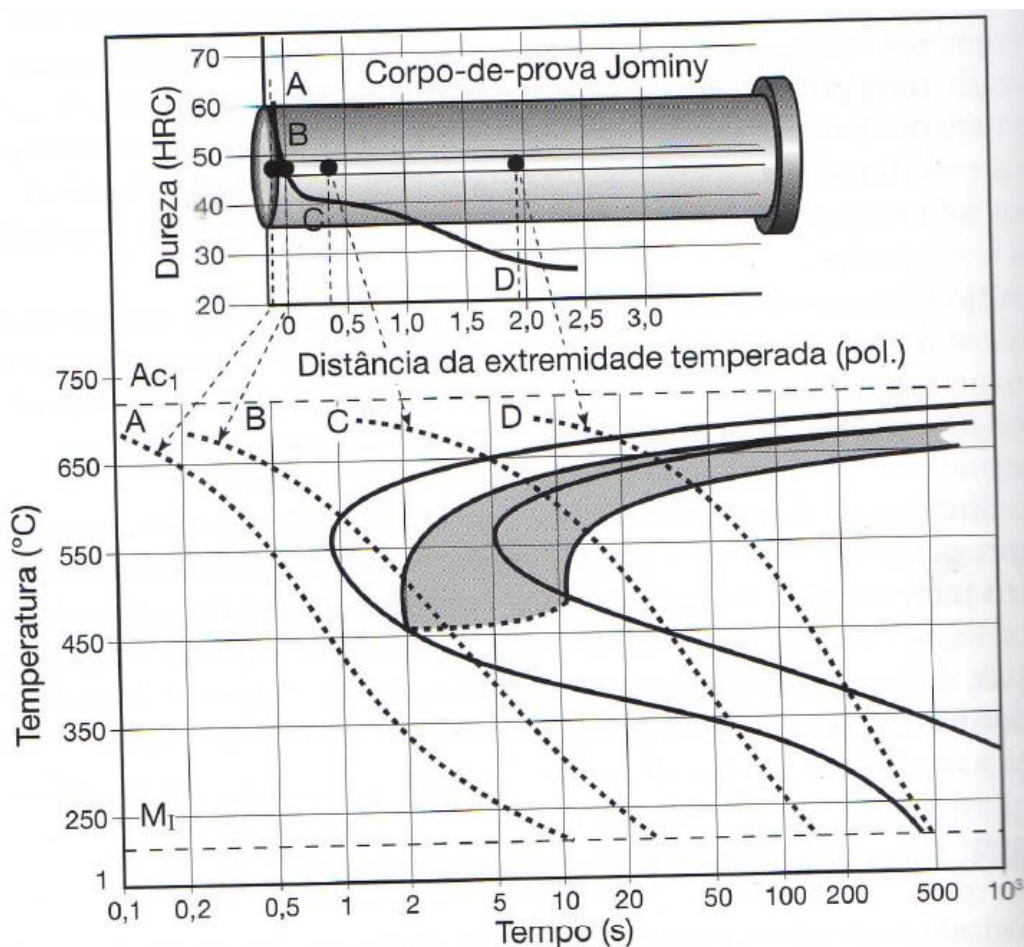
O ensaio de temperabilidade Jominy também conhecido como “ensaio de resfriamento da extremidade” é o método mais utilizado em todo o mundo, pois com apenas um corpo de prova é possível gerar uma ampla faixa de velocidades de resfriamento. Para realizar esse procedimento o corpo de prova é austenitizado em condições definidas por norma, após retirada do forno, a peça é resfriada a partir da extremidade por um jato de água em condições controladas no dispositivo Jominy por 10 minutos, em seguida resfriada por completo [8, 9, 11].

Figura 4 – Dispositivo Jominy.



Decorrido o tempo de resfriamento retifica-se a superfície longitudinalmente do corpo de prova e realiza-se a medição da dureza obtida a partir da extremidade resfriada nas distâncias especificadas pela norma. O resultado é que cada posição da superfície do corpo de prova resfria com uma velocidade diferente e sofre diferentes transformações. A Figura 5 mostra as diferentes durezas superpostas a um diagrama TTT.

Figura 5 – Dureza versus distância do corpo de prova.



Fonte: [8]

Para aços em que a curva Jominy é conhecida, é possível estimar, para determinada posição em peça de dimensão e geometria conhecida, qual seria sua dureza na condição de “como temperado” [8].

2.4.3 Ensaio de Dureza Rockwell

O ensaio de dureza Rockwell é mais utilizado internacionalmente. Esse tipo de ensaio de dureza utiliza-se da profundidade da impressão causada por um penetrador sob a ação de uma carga como indicador da medida de dureza. A dureza Rockwell pode ser classificada como comum ou superficial, dependendo da pré-carga e carga aplicadas.

A profundidade de penetração é correlacionada pela máquina de ensaio a um número arbitrário, cuja leitura é feita diretamente na escala do equipamento, após a retirada da carga total, mantendo-se entretanto a carga inicial ou pré-carga.

Este método utiliza vários penetradores e cargas, este é dividido em escalas dependendo das combinações, as comuns: B, C, A, D, E, F, G, H, K, L, M, P, R, S e V e superficiais: 15N ou 15T, 30N ou 30T e 45N ou 45T. O número de dureza Rockwell é sempre designado pelo símbolo HR seguido da escala utilizada, precedidos do valor numérico. A Tabela 5 mostra algumas das várias escalas existentes para a dureza Rockwell [16].

Tabela 5 – Características das escalas de Dureza Rockwell.

Escala	Penetrador	Carga (kgf)	Aplicações Típicas
C	Diamante	150	Materiais duros: aços temperados, ferramentas
D	Diamante	100	Aços endurecidos com reduzida espessura ou camada superficial
B	Esfera 1,59 mm	100	Aços não temperados, ferros fundidos, algumas ligas não ferrosas
F	Esfera 1,59 mm	60	Ligas de cobre, de alumínio, de zinco, de magnésio, metais moles
E	Esfera 3,17 mm	100	Ferros fundidos, ligas de alumínio e magnésio, metais moles e plásticos
45N	Diamante	45	Aços temperados superficialmente ou revestidos, metal duro
15T	Esfera 1,59 mm		Chapas finas de cobre, alumínio, zinco, magnésio, chumbo, estanho
30T	Esfera 1,59 mm		Ligas de cobre, de alumínio, zinco, de magnésio
45T	Esfera 1,59 mm		Bronzes, latões, ferros fundidos maleáveis, ligas não ferrosas

Fonte: [16]

O teste de dureza Rockwell é bastante versátil e confiável; no entanto, devem ser tomadas algumas precauções:

- Deve-se realizar o ensaio em materiais desconhecidos partindo de escalas mais altas (penetrador de diamante) para evitar danos no penetrador, seguido posteriormente de escalas mais baixas (penetrador de esfera);
- O penetrador e o suporte devem estar limpos e bem-assentados;
- A superfície a ser testada deve estar limpa e seca, plana e perpendicular ao penetrador.

Além de aferir a escala e pré-carga a serem utilizadas.

2.5 CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA

A caracterização metalográfica é uma parte da metalurgia que se destina ao estudo da macroestrutura e da microestrutura de metais e de suas ligas. Através deste estudo pode-se analisar um material e prever seu comportamento sob determinadas solicitações mecânicas ou químicas. Através destas análises também é possível identificar determinados defeitos do material, a maneira pela qual ele foi feito e identificar e quantificar seus constituintes. O ensaio metalográfico pode ser: macrográfico ou micrográfico [8].

2.5.1 Macrográfico

A macrografia consiste no exame do aspecto de uma superfície plana seccionada de uma peça ou amostra metálica, devidamente polida e atacada por um reagente químico adequado, e observando as heterogeneidades ou defeitos que possam estar associados ao material ou ao processo de fabricação que tenha sido utilizado como trincas, segregações, porosidades, texturas ou outras irregularidades, ou examinar-se a profundidade de um tratamento térmico, por exemplo. O exame pode ser feito a olho nu ou com ampliação máxima de 10 vezes [8, 17].

A preparação do corpo de prova para análise de macrografia abrange as seguintes fases:

- a) Escolha e localização da seção a ser estudada;
- b) Preparação de uma superfície plana e polida no lugar escolhido;
- c) Ataque dessa superfície por um reagente químico adequado.

2.5.2 Micrográfico

Atualmente há uma variedade de técnicas para observar a estrutura dos aços em escala microscópica, tais como microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura (MEV), microscopia eletrônica de transmissão (MET). Dentre as diversas técnicas, a mais comum é a microscopia ótica. Que consiste em uma técnica de observação de objetos e sistemas com ampliações de algumas dezenas até milhares de vezes das dimensões físicas, tipicamente 10X a 1500X. O microscópio ótico mais simples possui duas lentes, uma objetiva e outra ocular, montadas em uma estrutura, com um suporte para anteparo do material a ser observado, denominado porta amostra.

Assim como na macrografia, a micrografia exige a preparação do corpo de prova para análise e abrange as seguintes fases:

- a) Escolha e localização da seção a ser estudada;
- b) Obtenção de uma superfície plana e polida no local escolhido para estudo;
- c) Ataque da superfície por um reagente químico adequado.

2.5.3 Etapas para realizar a Caracterização Metalográfica

Para realizar a metalografia (macrográfica e micrográfica) é necessário seguir algumas etapas, dentre as quais:

a) Inspeção preliminar

Através da inspeção preliminar pode-se obter informações básicas do material, principalmente de caráter qualitativo, as quais podem ser:

- Aspecto da superfície;
- Aspecto da falha / fratura (dúctil/frágil);
- Dureza (ação da lima);
- Composição química (centelhas no esmeril);
- Magnetismo;
- Sonoridade.

b) Critérios para análise

É necessário determinar quais serão os parâmetros estruturais a serem investigados na amostra em preparação, podendo ser:

- Defeitos de solidificação;
- Textura;
- Macrosegregação;
- Estrutura bruta;
- Trincas e tratamentos de superfície.

c) Identificação da amostra

A identificação do material a ser analisado é muito importante, podendo ser feita através de etiquetas e marcações, para diferenciar amostra das demais não permitindo que ocorram trocas com outras amostras.

d) Extração da amostra

O corte da amostra pode ser feito de duas maneiras, no sentido longitudinal ou transversal da peça ou amostra, e dependerá do que se deseja visualizar.

O corte no sentido longitudinal é recomendável quando se deseja fazer as seguintes análises:

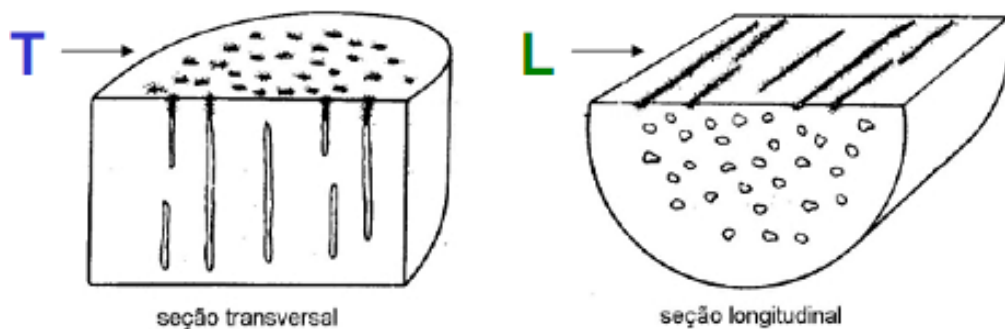
- Do processo de fabricação;
- Das roscas;
- Da qualidade de solda;
- Dos tratamentos superficiais.

O corte no sentido transversal é recomendável quando se deseja fazer as seguintes análises:

- Da natureza do material;
- Da homogeneidade;
- Da segregação;
- Da presença de defeitos.

Percebe-se na Figura 6, duas amostras seccionadas nos dois sentidos com a finalidade visualizar as diferentes morfologias:

Figura 6 – Influência da orientação da seção em relação à anisotropia das inclusões não-metálicas em produtos conformados a quente.



Fonte: [8]

Além disso, o corte da peça pode ser feito através de diferentes processos. Maçarico, com serra mecânica e disco abrasivo (policorte).

O corte por maçarico é indicado para corte de amostras de materiais ferrosos em grandes fragmentos, tendo o inconveniente que o intenso aquecimento local pode implicar em alterações estruturais da amostra.

O corte também pode ser feito através de serra mecânica. Aplicado em materiais em geral, permite bom controle do corte, porém não é utilizado em materiais muito duros.

Já o corte feito com discos abrasivos, sob refrigeração, possibilita obter seções com boa qualidade e baixo nível de modificações na estrutura da amostra.

e) Desbaste

O desbaste ou lixamento é realizado para que se obtenha uma superfície adequada para a análise. O desbaste é conseguido através de lixas, que são

compostas de partículas de material abrasivo coladas em um substrato que pode ser de papelão ou de tecido. O material abrasivo das lixas é o carboneto de silício (SiC).

A preparação da superfície de interesse envolve o lixamento com resfriamento e lubrificação por água. A sequência usual de lixas é: 100 (ou 120) (ou 180), 240, 320, 400, 600, (800) e 1200. Devendo-se mudar de 90° a direção do lixamento ao se passar de um abrasivo a outro e seguir o quanto possível a série como está indicada.

f) Ataque químico

Para revelar a estrutura é necessário realizar o ataque químico. O primeiro passo para a realização do ataque químico é a escolha do reagente. A seguir, é necessário observar os cuidados de segurança do trabalho e cuidados ambientais relativos ao uso e ao descarte do reagente.

A superfície da amostra, quando atacada por reagentes específicos, sofre uma série de transformações eletroquímicas baseadas no processo de óxido-redução, cujo aumento do contraste se deve às diferenças de potencial eletroquímico. O reagente mais utilizado para revelar a macro e microestrutura dos aços é o Nital (1 a 5% - 1 a 5 mL de HNO₃ e 99 a 95 mL de etanol).

O ataque químico pode ser realizado de diferentes maneiras, conforme Tabela 6.

Tabela 6 – Tipos de ataque químico.

Método do ataque	Descrição
Por imersão	A superfície da amostra é imersa na solução de ataque.
Por gotejamento	A Solução de ataque é gotejada sobre a superfície da amostra.
Por lavagem	A superfície da amostra é enxaguada com solução de ataque. Usado em casos de amostras muito grandes.
Alternativo por imersão	A amostra é imersa alternadamente em duas soluções. As camadas oriundas do ataque com a primeira solução são removidas pela ação do segundo reagente.
Por esfregação	A solução de ataque, embebida em um chumaço de algodão ou pano, é esfregada sobre a superfície da amostra, o que serve para remover as camadas oriundas da reação.

Fonte: [8]

A duração do ataque depende da concentração do reativo e da natureza e estrutura do material a ser examinado.

Terminado o ataque, lava-se imediatamente a superfície com álcool. Em seguida, procede-se à secagem.

g) Análise da estrutura

A análise da macroestrutura consiste em identificar as ocorrências presentes na amostra, ou seja, a distribuição e natureza das falhas, impureza e ao processo de fabricação, qualidade de solda profundidade de tratamentos térmicos entre outras características. Na análise da microestrutura pode-se verificar as fases, a sua natureza, composição, quantidade, tamanho, forma, distribuição e orientação dos grãos e contornos de grãos [2, 6, 8].

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Com exceção da usinagem dos corpos de prova, todo o trabalho foi realizado nos laboratórios da universidade.

3.1 MATERIAIS

Para a realização do ensaio foi usado uma amostra de aço SAE 1140, fornecido por uma empresa local. Segue relação de equipamentos utilizados:

- Torno convencional (usinagem – terceiros);
- Forno mufla para o tratamento térmico;
- Dispositivo Jominy para ensaios de temperabilidade;
- Termopar;
- Paquímetro
- Durômetro de bancada;
- Máquina de policorte;
- Kit EPI.

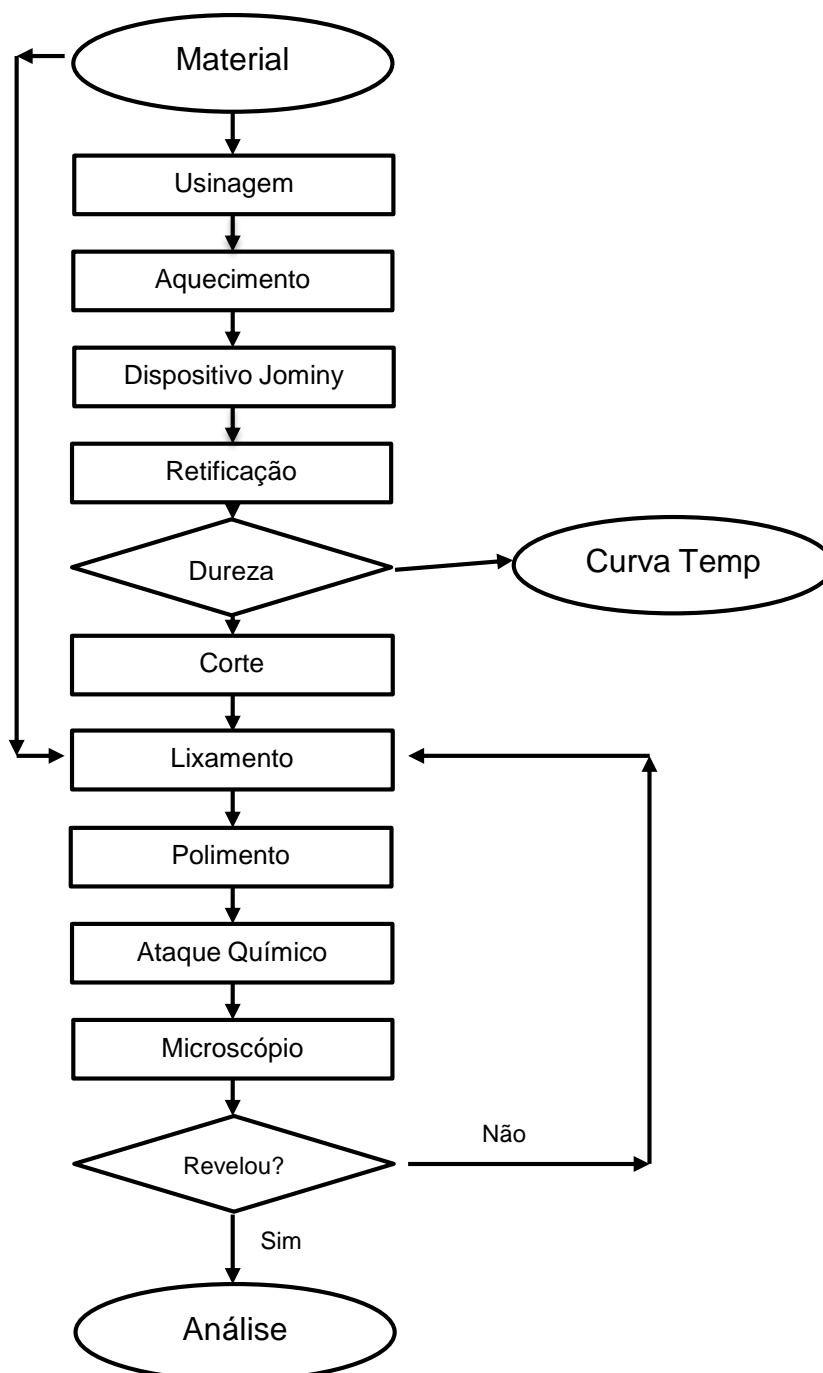
Para a análise metalográfica foi utilizado os seguintes materiais e equipamentos:

- Jogos de lixas d'água com mesh/malha crescente (nº 100, 180, 220, 320, 400, 600 e 1200);
- Lixadeira e politriz;
- Pasta de diamante de 6 μ m, 3 μ m e 1 μ m;
- Nital 2% (2mL de HNO₃ em 98mL etanol);
- Microscópio ótico.

3.2 METODOLOGIA

Este trabalho consiste em fazer levantamento da curva de temperabilidade do aço SAE 1140, inexistente na literatura, e caracterizar metalograficamente para aferição da microestrutura formada. A figura 7 mostra o fluxograma referente a metodologia utilizada neste trabalho.

Figura 7 – Fluxograma.



Fonte: Autor.

3.2.1 Obtenção e preparação de amostras

O material foi cedido pela empresa Sinobrás, este por sua vez foi levado ao torneiro mecânico para confeccioná-lo de acordo com as medidas da norma ABNT NBR 6339 para o ensaio de temperabilidade. A Tabela 7 mostra a composição química do aço.

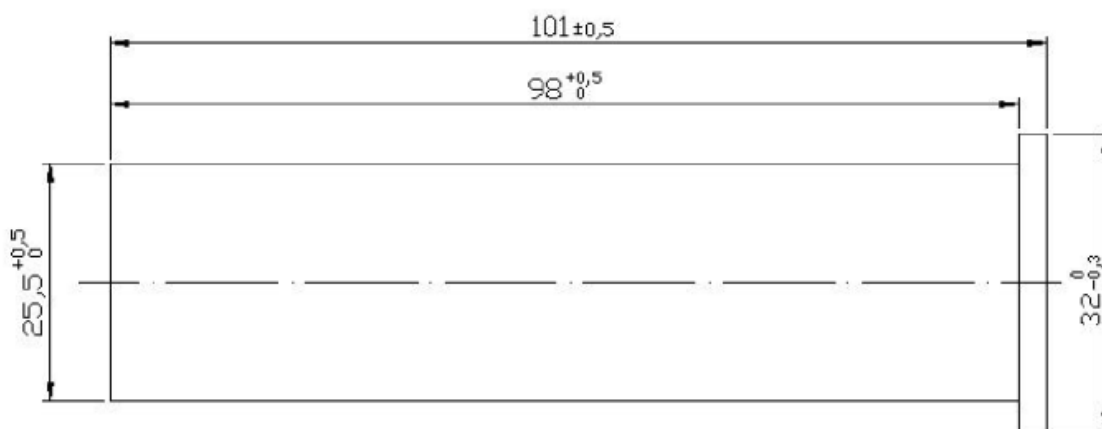
Tabela 7 – Composição química do aço SAE 1140.

Elementos de liga	% em massa
C	0,403
Si	0,189
Mn	0,845
P	0,016
S	0,020
Cr	0,058
Mo	0,008
Ni	0,063
V	0,033
Cu	0,341
Nb	0,030
Sn	0,019

Fonte: Sinobrás.

As Figuras 8 e 9 mostram desenho das dimensões dos corpos de prova e foto dos CP's já usinados, respectivamente.

Figura 8 – Desenho do corpo de prova, dimensões em mm.



Fonte: [8]

Figura 9 – Corpos de prova para realizar ensaio Jominy.



Fonte: Autor.

3.2.2 Ensaio Jominy

Os corpos de prova foram aquecidos até chegar a temperatura de 860°C, permanecendo nessa temperatura durante uma hora com o intuito de austenitizar o aço. Após este tempo, foram retirados os CP's do forno e, rapidamente, iniciou-se o resfriamento com o jato d'água usando o dispositivo Jominy durante dez minutos. A Figura 10 mostra o dispositivo utilizado, a temperatura atingida e CP's aquecidos ainda dentro do forno.

Figura 10 – a) dispositivo Jominy, b) temperatura de austenitização, c) CP's austenitizados.



a)



b)



c)

Fonte: Autor.

A Figura 11 mostra o andamento do ensaio pelo método de Jominy, no momento em que o corpo de prova foi retirado do forno e acondicionado ao dispositivo.

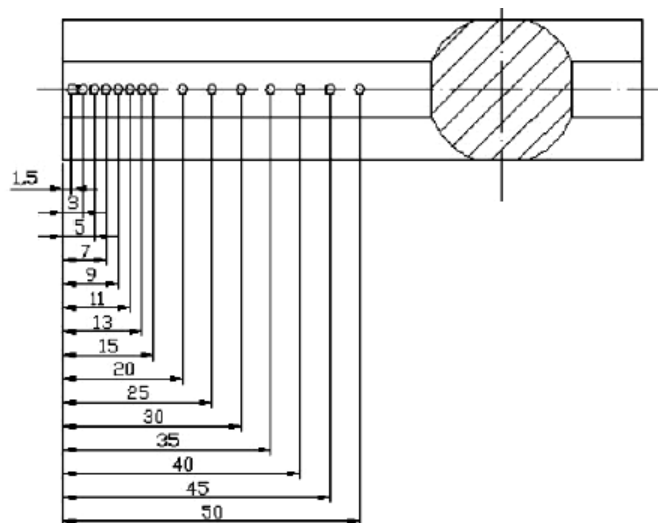
Figura 11 – Corpo de prova sendo ensaiado.



Fonte: Autor.

Para a medição dos níveis de dureza, as amostras tiveram os planos necessários retificados com profundidades entre 0,5 e 0,9mm. A dureza foi medida no Laboratório de Ensaio Destrutivos da Faculdade de Engenharia de Materiais com um durômetro de bancada da marca Pantec, utilizando ponta de diamante resultando em dureza na escala Rockwell C. A Figura 12 exibe um esquema das posições das medições de dureza. Após feitas as medições de dureza, foram coletados os resultados e levantada a curva de temperabilidade do aço estudado.

Figura 12 – Corpo de prova retificado e posições de medição ao longo do seu comprimento a partir da extremidade temperada. Dimensões em milímetro.



Fonte: [8]

3.2.3 Análise da dureza

As medidas referentes aos níveis de dureza foram feitas longitudinalmente dos corpos de prova com durômetro de bancada da marca Pantec, conforme mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Durômetro.



Fonte: Autor.

Foram aferidas as medições de durezas em cada parte retificada dos corpos de prova, seis em cada CP.

3.2.4 Análise metalográfica

Além do ensaio de temperabilidade Jominy, os corpos de prova foram seccionados e caracterizados a fim de visualizar suas microestruturas antes e depois da têmpera. Foram realizados o lixamento, polimento e o ataque químico na peça utilizando o reagente Nital 2% no Laboratório de Preparação de Amostras. A análise microscópica foi realizada no Laboratório de Microscopia Ótica da Faculdade de Engenharia de Materiais utilizando Microscópio Óptico de Reflexão Olympus BX51.

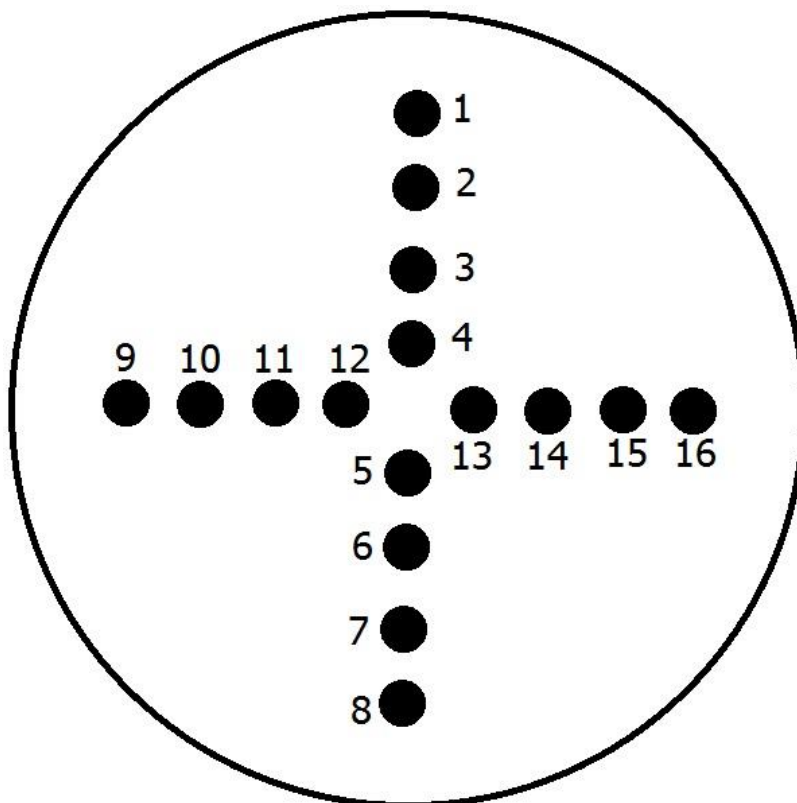
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados médios de dureza para cada ponto dos corpos de prova ensaiados e metalografia são mostrados a seguir.

4.1 ENSAIO JOMINY PARA O AÇO SAE 1140

Antes do tratamento térmico, a média de dureza do aço apresentada na sua seção transversal foi de 19,7 HRC, com o material temperado sua dureza alcançou o valor médio de 58,1 HRC. A medida de dureza foi feita em 16 posições na extremidade da peça de acordo com a Figura 14. Essas medidas foram feitas antes e depois do tratamento.

Figura 14 – Medida da dureza transversal.



Fonte: Autor.

A Tabela 8 mostra a média de dureza obtida em cada ponto longitudinalmente a partir da extremidade.

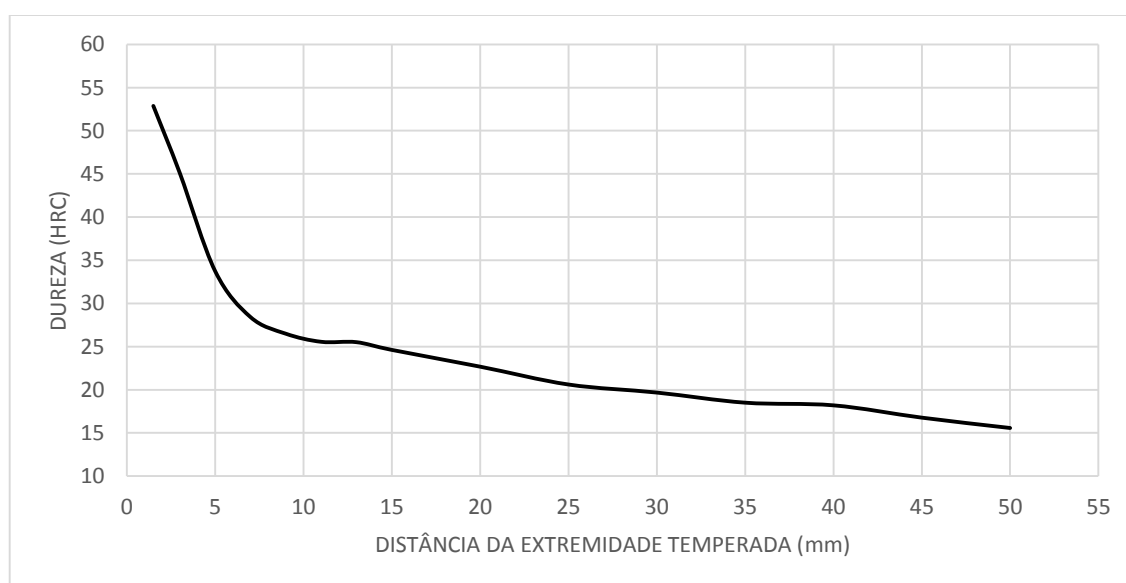
Tabela 8 – Médias das durezas.

Distância (mm)	Dureza (HRC)
1,5	52,9
3	45,1
5	33,7
7	28,4
9	26,5
11	25,6
13	25,5
15	24,6
20	22,7
25	20,6
30	19,7
35	18,5
40	18,2
45	16,8
50	15,6

Fonte: Autor.

Os dados adquiridos dos pontos de dureza dos corpos de prova, tornaram possível o levantamento da curva de temperabilidade do aço SAE 1140, visualizada na Figura 15.

Figura 15 – Curva de temperabilidade do aço SAE 1140.



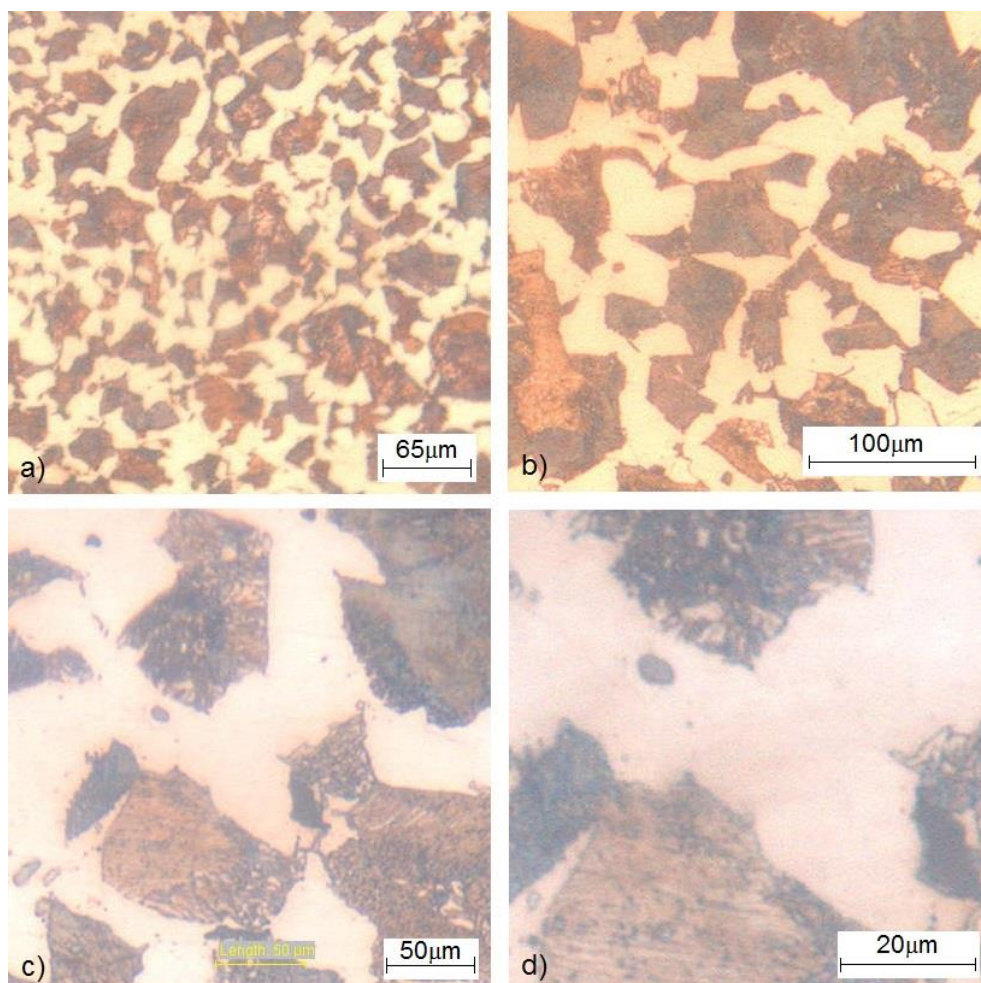
Fonte: Autor.

A partir desta curva foi visto que o aço estudado apresenta uma boa temperabilidade, pois apresentou um aumento significativo na sua dureza.

4.2 METALOGRAFIA

Em relação à análise da micrografia da amostra antes da têmpera, pode-se afirmar que há a presença de perlita em uma matriz ferrítica, visualizado na Figura 16. As inclusões não-metálicas de sulfeto de manganês favorecem a usinabilidade, pois formam um cavaco quebradiço, mas as mesmas só podem ser visualizadas no microscópio eletrônico de varredura (MEV).

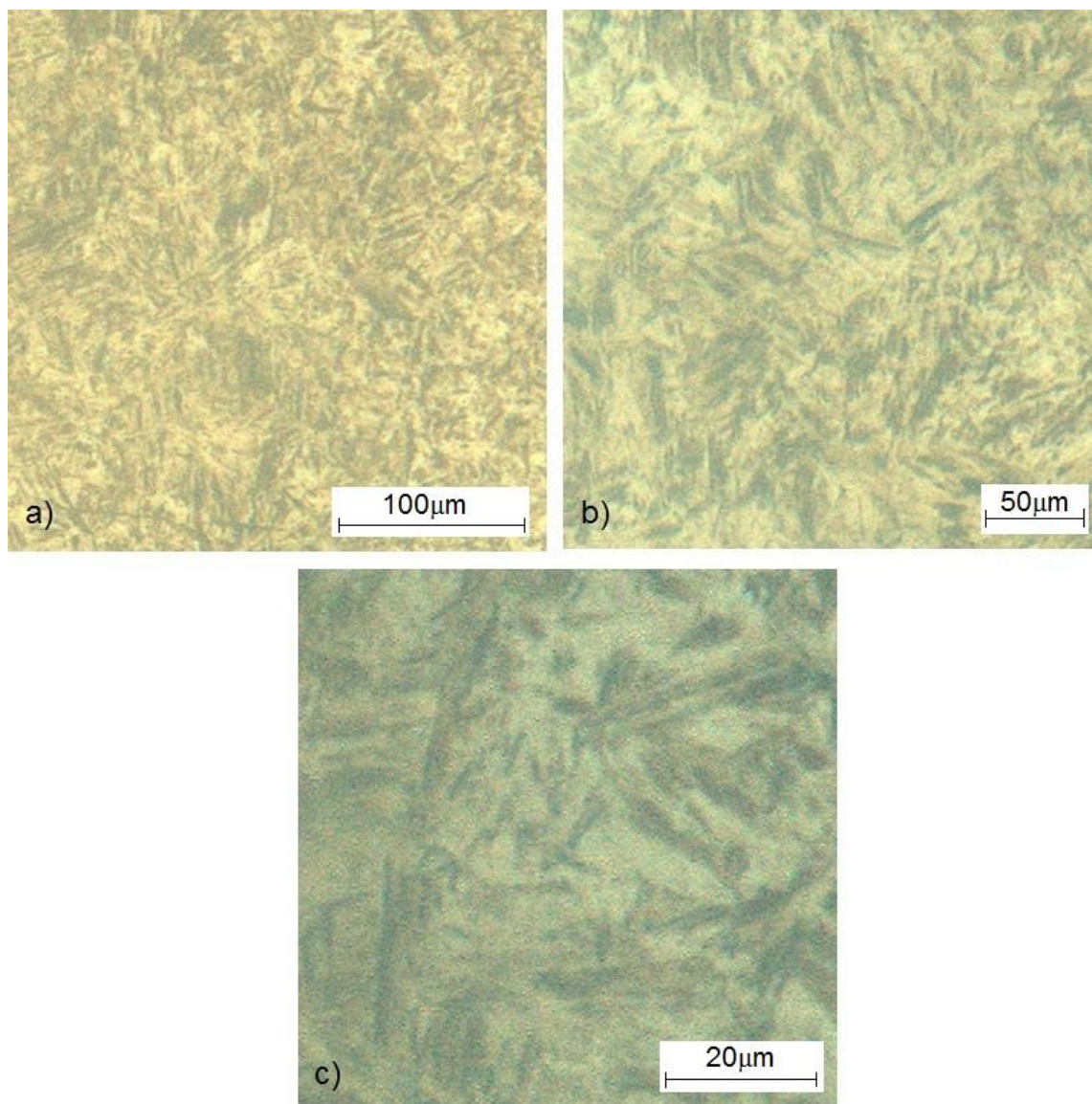
Figura 16 – Micrografia do aço SAE 1140 antes da têmpera. Aumento a) 150x; b) 300x; c) 750x; d) 1500x.



Fonte: Autor.

A diferença na microestrutura é notada quando o aço passa pelo tratamento térmico. A martensita é a fase metaestável responsável pelo aumento da dureza do aço e se apresenta na forma de agulhas, como visto na Figura 17.

Figura 17 – Micrografia do aço SAE 1140 após a têmpera. Aumento a) 300x; b)750x; c) 1500x.



Fonte: Autor.

A transformação martensítica gera uma fase metaestável nos aços, a qual apresenta propriedades mecânicas muito especiais. Além do aumento da dureza esta transformação faz com que a estrutura cúbica de face centrada da austenita se transforme em tetragonal de corpo centrado.

5 CONCLUSÕES

A partir dos dados e da curva de temperabilidade apresentados, foi constatada uma boa capacidade de têmpera do aço SAE 1140. A dureza foi elevada significativamente, se encontrando na faixa ideal para aços com o determinado teor de carbono, com aumento de 194,9%. Como não se possui tal curva disponível na literatura, a comparação com resultados publicados fica impossibilitada, contudo foi visto que o ensaio Jominy foi realizado com sucesso.

Na caracterização metalográfica foi possível visualizar a microestrutura perlítica em matriz ferrítica antes do tratamento. Após o tratamento térmico percebe-se a formação de uma nova microestrutura, sendo esta martensítica. Comparando a microestrutura antes e após o tratamento térmico pode-se afirmar que o método utilizado para realizar este ensaio foi eficaz.

Apesar do aço fornecido ser chamado de 1140, o mesmo não pode ser classificado como os da família 11xx, ou seja, um aço resulfurado, pois seu teor de enxofre está abaixo da especificação, que fica entre 0,08 a 0,13%. Considerando o teor de carbono, manganês e enxofre, o aço estudado assemelhasse com os da família 10xx, aço carbono comum. No entanto, possui altos teores de nióbio e vanádio que podem conferir melhoria das propriedades do aço, especialmente nos aços de alta resistência.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Um tratamento térmico e termoquímico no aço SAE 1140 e caracterizar antes e depois do tratamento.
- Mudar o método de temperabilidade, por exemplo, realizar o ensaio Grossmann.
- Levantamento das propriedades mecânicas do aço SAE 1140.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. INSTITUTO AÇO BRASIL. **O Aço – História**. Instituto Aço Brasil, 2009. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/aco/introducao.asp>>. Acesso em: 06/set/2014.
2. CALLISTER, W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 7. ed. São Paulo: LTC, 2008.
3. SHACKELFORD, J. F. **Introdução à Ciência dos Materiais para Engenheiros**. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
4. AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **ASM Handbook: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys**. 10. ed. v. 1. Ohio: ASM International, 1993.
5. SILVA, A. L. C; MEI, P. **Aços e Ligas Especiais**. 2. ed. Sumaré: Eletrometal S.A. Metais Especiais, 1988.
6. CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica**. 2. ed. v. 3. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
7. CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7. ed. São Paulo: ABM, 2012.
8. COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4ª ed. São Paulo: Blucher, 2008.
9. CHIAVERINI, V. **Tratamentos Térmicos das Ligas Metálicas**. São Paulo: ABM, 2003.
10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6339: Aço – Determinação da Temperabilidade (Jominy)**. Rio de Janeiro, 1989.
11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 136: Tratamentos Térmicos de Aço – Terminologia e Definições**. Rio de Janeiro, 2000.
12. MSPC – Informações Técnicas. **Ferros & Aços**. 2009. Disponível em <<http://www.mspc.eng.br/ciemat/aco120.shtml>>. Acesso em: 02/dez/2014.
13. MARTINS, M. **Temperabilidade Jominy e Influência de Revenido sobre a Dureza – Um Estudo em Aços Estruturais Nacionais**. UFSC, Florianópolis - 2002
14. MALFATTI, C. F. **Dessulfuração**. UFRGS. Disponível em <http://www.ufrgs.br/termodinamica2/crbst_59.html>. Acesso em 02/dez/2014.
15. MONTEIRO, D. **Seleção e Especificação de Materiais Metálicos para Construção Mecânica: Do Cálculo Mecânico ao Tratamento Técnico**. São Paulo: Raízes, 2013.
16. DOS SANTOS, C. A.; SPIM, J. A.; GARCIA, A. **Ensaio dos Materiais**. Rio de Janeiro, 2008.
17. AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **ASM Handbook: Metallography and Microstructures**. 10. ed. v. 9. Ohio: ASM International, 2004.