

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

**VICTOR HENRIQUE MARTINS ORTEGA**

**OBTENÇÃO DA CURVA DE ENDURECIBILIDADE E DA  
MICROESTRUTURA DO AÇO AISI H13 TRATADO VIA ENSAIO  
JOMINY**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**LONDRINA**

**2017**

**VICTOR HENRIQUE MARTINS ORTEGA**

**OBTENÇÃO DA CURVA DE ENDURECIBILIDADE E DA  
MICROESTRUTURA DO AÇO AISI H13 TRATADO VIA ENSAIO  
JOMINY**

Monografia do trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Professor: Dr. Odney Carlos Brondino.

**LONDRINA**

**2017**



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Londrina  
Coordenação de Engenharia de Materiais



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

VICTOR HENRIQUE MARTINS ORTEGA

### OBTENÇÃO DA CURVA DE ENDURECIBILIDADE E DA MICROESTRUTURA DO AÇO AISI H13 TRATADO DIA ENSAIO JOMINY

Trabalho de conclusão de curso apresentado no dia 12 de junho de 2017 como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Dr. Andre Luis da Silva  
(UTFPR – DAMEC)

---

Prof. Roger Nabeyama Michels  
(UTFPR – DAMEC)

---

Prof. Odney Carlos Brondino  
(UTFPR – DAEMA)

---

Profº. Drº. Fabiano Moreno Perez  
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)  
Coordenadora do Curso de Engenharia de Materiais

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.”

## RESUMO

ORTEGA, V. H. M. **Obtenção da curva de endurecibilidade e da microestrutura do aço AISI H13 tratado via ensaio Jominy.** 2017. 68 folhas. Exame de qualificação do trabalho de conclusão de curso – Departamento de Engenharia de Materiais - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2017.

O aço H13 é amplamente utilizado em trabalhos de conformação plástica a quente. Compreender seu comportamento tal como seus processamentos até sua utilização é essencial. Para adquirir as propriedades desejadas deste material, são realizados tratamentos térmicos que devem ser analisados, tais como a dureza na superfície do componente e no interior, que irá apresentar durezas diferentes da superfície. O ensaio Jominy, na qual foi realizado no aço AISI H13, visou obter a dureza do material conforme se distancia da superfície tratada, com o propósito de observar esta dureza sem precisar realizar ensaios destrutivos, segundo a norma ASTM A255. Além disso, para se obter uma melhor análise, é necessário saber a microestrutura obtida no material. Para isso foi realizado uma metalografia no material. Concluiu-se que o ensaio Jominy, por mais que se distancie da superfície tratada, não altera a dureza e sua microestrutura, na qual se mostrou ser martensítica em toda sua extensão, com dureza próxima de 55 HRC.

**Palavras-chave:** Tratamentos térmicos. Dureza. Metalografia. ASTM A255.

## ABSTRACT

ORTEGA, V. H. M. **Obtaining the AISI H13 steel hardness curve and microstructure treated by Jominy test.** 2017. 68 p. Undergraduate Thesis – Materials Engineering, Federal Technological University of Paraná. Londrina, 2016.

The H13 steel is largely used in hot plastic conformation works. Understand your comportment, such as your process until its use is essential. In order to obtain its proprieties, performed heat treatments must be analyzed, such as its hardness in the surface and in the inside of the material, which is different that it is on the treated surface. The Jominy test, which was executed on the H13 steel, obtain hardness according to the distance of the treated surface, with the purpose of notice this hardness without using destructive tests, following ASTM A255 standart. Therefore, in order to get better analysis, it is necessary to know the microstructure in the material. To do that, metallography was made in the material. It was concluded that the Jominy test, however the distance from the treated surface, does not affect the hardness and de microstructure, which maintain its proprieties in all the sample extension, which is a martensitic structure with hardness proximally to 55 HRC.

**Keywords:** Heat treatments. Hardness. Metallography. ASTM A255.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Estruturas cristalinas (a): cúbica de corpo centrado (CCC), (b): cúbica de face centrada (CFC) e (c): tetragonal de corpo centrado (TCC) .....	16
Figura 2 - Diagrama de fases Fe-Fe <sub>3</sub> C, demonstrando a mudança de fases na temperatura de austenização .....	17
Figura 3 - Gráfico Temperatura em função do Tempo quando realizado a têmpera. 18	
Figura 4 - Micrografia óptica mostrando a morfologia da martensita e seus tamanhos de grãos de acordo com a temperatura de austenização: (a) 1200 à 780°C e (b) 780°C .....	20
Figura 5 - Curva TTT do aço 52100 .....	20
Figura 6 - Curva "TTT" do aço AISI H13 .....	24
Figura 7 - Influência da temperatura de revenimento para a dureza do aço AISI H13 .....	25
Figura 8 - Influência do tempo de revenimento na dureza do aço AISI H13 .....	26
Figura 9 - Tratamento térmico realizado no aço AISI H13 .....	27
Figura 10 - Amostra quando submetida ao ensaio Jominy .....	29
Figura 11 - Exemplo de uma curva de endurecibilidade, contendo um corpo de prova .....	30
Figura 12 -- Diagrama I-T junto com a curva de endurecibilidade do aço 5160 .....	31
Figura 13 - Cortadora politriz metalográfica .....	33
Figura 14 - Amostra após o embutimento com resina termoplástica.....	34
Figura 15 - Demonstração de como se deve secar a amostra com o ar quente .....	36
Figura 16 - Microscópio óptico invertido .....	37
Figura 17 - Fluxograma do procedimento de realizado no experimento .....	38
Figura 18 - Fotos do material utilizado (1): barra como comprada, e (2): material já usado.....	41
Figura 19 - Demonstração de como são as dimensões da amostra .....	41
Figura 20 -Imagens do material antes de ser normalizado. (1) e (2): Demonstração de como as amostras foram colocadas no forno, sendo as imagens respectivas à primeira e à segunda fornada, (3) e (4): Fotos das amostras dentro do forno, sendo as imagens respectivas à primeira e segunda fornada .....	42
Figura 21 - Fotos da amostra após retiradas da normalização (1): da primeira vez, e (2): da segunda vez.....	43
Figura 22 - Amostra com a mistura álcool/grafite em sua superfície.....	44
Figura 23 - Aparato utilizado no ensaio Jominy.....	45
Figura 24 - Amostra, ainda aquecida, sendo tratada no aparato do ensaio Jominy..	45
Figura 25 - (1): amostra já tratada sem usinagem, e (2): amostra com usinagem ....	46
Figura 26 – Foto demonstrando como o suporte funciona. A seta vermelha revela o movimento realizado para mover idealmente a amostra. ....	48
Figura 27 - Suporte sendo utilizado, revelando o resultado final.....	48

Figura 28 - Fotos demonstrando como a amostra foi cortada para a metalografia. (1): amostra antes de ser cortada, e (2): amostra após um corte, ainda na cortadora, e (3): Amostra após o corte .....	49
Figura 29 - Demonstração de onde foi realizado a metalografia, após o corte final da amostra .....	50
Figura 30 - Amostra após ser lixada e traçada, antes de ser polida.....	51
Figura 31 - Amostra após ser lixada, traçada e polida. Pode-se notar a presença de carbonetos na superfície polida.....	52
Figura 32 - Média de dureza das amostras normalizadas em HRC .....	56
Figura 33 - Média de dureza das amostras normalizadas em HRB .....	57
Figura 34 - Durezas obtidas de todos os pontos ensaiados, em HRC.....	59
Figura 35 - Média dos pontos ensaiados, em HRC.....	60
Figura 36 - Cores dos metais relacionado a temperatura .....	61
Figura 37 – Imagem da estrutura do material em uma distância de 1/16” da base. Aumento de 800x. Ataque Nital 3%.....	62
Figura 38 - Imagem da estrutura do material em uma distância de 3/16” da base. Aumento de 800x. Ataque Nital 3%.....	63
Figura 39 - Imagem da estrutura do material em uma distância de 5/16” da base. Aumento de 800x. Ataque Nital 3%.....	63
Figura 40 - Imagem da estrutura do material em uma distância de 7/16” da base. Aumento de 800x. Ataque Nital 3%.....	64
Figura 41 - Imagem da estrutura do material em uma distância de 9/16” da base. Aumento de 800x. Ataque Nital 3%.....	64
Figura 42 - Imagem da estrutura do material em uma distância de 13/16” da base. Aumento de 800x. Ataque Nital 3%.....	65
Figura 43 - Imagem da estrutura do material em uma distância de 15/16” da base. Aumento de 800x. Ataque Nital 3%.....	66
Figura 44 - Imagem da estrutura do material em uma distância de 1 1/16” da base. Aumento de 800x. Ataque Nital 3%.....	66
Figura 45 - Imagem da estrutura do material em uma distância de 1 3/16” da base. Aumento de 800x. Ataque Nital 3%.....	67
Figura 46 - Imagem da estrutura do material em uma distância de 1 5/16” da base. Aumento de 800x. Ataque Nital 3%.....	67
Figura 47 – Microestrutura obtida das amostras. (1): Em uma distância de 1/16” da base, e (2): em uma distância de 1 5/16” da base. Ampliação de 800x. Ataque Nital 3%.....	68
Figura 48 - Metalografia do aço H13 após têmpera encontrado na bibliografia. ....	69
Figura 49 - Microestrutura obtida em diferentes partes da amostra 23. (1): Com distância de 1/16", e (2): Com distância de 1 5/16". Ampliação de 400x. Ataque nital 3%. ....	70
Figura 50 – Figura ilustrativa de todos os resultados obtidos. ....	71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do aço AISI H13 .....	13
Tabela 2 –Propriedades mecânicas e térmicas do aço AISI H13.....	14
Tabela 3 - Durezas obtidas nas amostras normalizadas, em HRC .....	55
Tabela 4 –Durezas obtidas nas amostras normalizadas, em HRB .....	56
Tabela 5 - Durezas obtidas das amostras submetidas ao ensaio Jominy.....	58



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CCC	Estrutura Cúbica de Corpo Centrado
CFC	Estrutura Cúbica de Face Centrada
$\Delta T$	Diferença de temperatura
$^{\circ}C$	Graus Celsius
$^{\circ}F$	Graus Fahrenheit
t	Tempo de resfriamento
TCC	Estrutura Tetragonal de Corpo Centrado
TTT	Diagrama Tempo-Temperatura-Transformação
HRB	Dureza na escala Rockwell B
HRC	Dureza na escala Rockwell C
HV	Dureza na escala Vickers

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
1.1 OBJETIVOS .....	11
1.1.1 Objetivo Geral .....	11
1.1.2 Objetivos Específicos .....	11
1.2 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA .....	11
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>13</b>
2.1 AÇO AISI H13 .....	13
2.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS .....	15
2.2.1 Têmpera .....	15
2.2.2 Revenimento .....	21
2.2.3 Normalização .....	22
2.2.4 Tratamentos Térmicos no Aço AISI H13 .....	23
2.3 ENSAIO JOMINY .....	28
2.4 METALOGRAFIA .....	31
2.4.1 Corte .....	32
2.4.2 Embutimento .....	33
2.4.3 Lixamento/Polimento .....	34
2.4.4 Ataque químico .....	35
2.4.5 Microscopia óptica .....	36
<b>3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO DE PESQUISA</b> .....	<b>38</b>
3.1 FLUXOGRAMA DE ATIVIDADES .....	38
3.2 MATERIAIS E VIDRARIAS UTILIZADAS .....	39
3.2.1 Ensaio Jominy .....	39
3.2.2 Metalografia .....	39
3.3 METODOLOGIA .....	40
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>54</b>
4.1 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS .....	54
4.1.1 Amostras do ensaio Jominy .....	54
4.1.2 Metalografia .....	62
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	<b>72</b>
<b>6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>73</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>74</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os metais ao longo da história foram os materiais com a maior utilização. Este fato é causado devido suas ótimas propriedades mecânicas, que são ductilidade, resistência mecânica, sua isotropia, entre outros. Com o advento da tecnologia, novos materiais surgiram em várias outras aplicações, e as áreas de aplicação dos metais foi diminuída. Contudo, é impossível substituir os metais em diversas ocasiões. O advento da tecnologia trouxe também novos metais, com melhores propriedades em geral, inclusive o aço AISI H13.

O aço AISI H13 é um aço amplamente utilizado para trabalhos de conformação a quente, tais como matrizes de extrusão de alumínio, moldes para fundição, facas para corte a quente, entre várias outras aplicações. Sua composição com altos teores de cromo, vanádio e molibdênio garante a ele alta resistência em altas temperaturas, boa capacidade de usinagem e excelentes propriedades quando tratados termicamente.

Estes tratamentos térmicos visam aumentar a resistência mecânica do material. Tratamentos mais convencionais utilizados no aço AISI H13 são: normalização, têmpera e revenimento. Normalização consiste em aquecer o material até a temperatura de austenização e a seguir deixar o material resfriar ao ar, diminuindo assim tensões residuais de sua estrutura. Têmpera consiste em aquecer o material até acima da temperatura de austenização e submeter este a um choque térmico, afim de realizar uma transformação martensítica, aumentando sua resistência, em troca de sua ductilidade. Revenimento consiste em aquecer o material de estrutura martensítica até uma temperatura menor que a temperatura de austenização e depois ser submetido ao resfriamento ao ar, diminuindo assim tensões térmicas causadas pela têmpera e fazendo a transformação de austenita retida para martensita.

Uma forma de se analisar a temperabilidade um material é o ensaio Jominy. Para a realização deste ensaio, é necessário uma prévia normalização de um corpo de prova e, após normalizado, aquecer este até a temperatura de austenização e subsequentemente lançar um jato de água em sua base (ASTM A255), realizando a têmpera nesta base. Após totalmente resfriado, é realizado ensaios de dureza com distancias normalizadas da base, formando assim graus de dureza conforme se

distancia da base. Isto pode ser colocado em um gráfico de dureza por distância, o que é chamado de curva de endurecibilidade.

Para se obter uma caracterização microestrutural de um material, é necessário realizar a metalografia, na qual uma amostra do material a ser estudado é passado por etapas que levam a amostra de um estado “natural” à uma na qual é ideal ser analisada por microscopia óptica, evitando erros de interpretação.

Estes processos de análise visam obter uma visão mais clara das propriedades do material, ajudando assim a escolha ideal da matéria prima para a sua aplicação em inúmeras situações.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Obter a curva de endurecibilidade do aço AISI H13 e, com a amostra tratada, obter imagens da microestrutura do material em diferentes partes da amostra

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar o ensaio Jominy no aço H13;
- Realizar os ensaios de dureza no material;
- Realizar a metalografia;
- Verificar a diferença de estrutura relacionando-a com a dureza obtida.

## 1.2 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

O aço H13 é um material muito versátil devido sua ampla utilização, tais como moldes de injeção de alumínio, facas para corte a quente, matrizes de fundição, entre outras. Isso ocorre devido a suas excelentes propriedades mecânicas, alta ductilidade e tenacidade. Além disso, este aço é de fácil aquisição em distribuidoras de aços.

Outra característica importante deste material é sua boa temperabilidade, podendo ser temperado em óleo, sais fundidos, martêmpera, na presença de vácuo e até mesmo ao ar, sob condições específicas. Por este motivo o aço H13 adquire suas ótimas propriedades mecânicas.

Por mais que este material apresente estas excelentes propriedades, não existe muitos estudos relacionados a este material, principalmente a sua temperabilidade.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 AÇO AISI H13

A linha dos aços classificada como H na norma AISI são aços de composição de Tungstênio, Molibdênio e Vanádio variantes de 6 a 25%. Entre eles, há uma divisão em três subgrupos: Cromo (H10 a H19), Tungstênio (H21 a H26), e Molibdênio (H42 e H43).

O aço AISI H13 é um aço de liga Cromo utilizado em altas temperaturas, mas também pode ser utilizado em temperaturas próximas de -53°C.

Sua composição permite que ele apresente alta resistência ao amolecimento a altas temperaturas, devido a formação de carbonetos causado pelos elementos cromo, tungstênio, vanádio e molibdênio. A presença de vanádio na composição também aumenta a resistência a erosão em altas temperaturas, dando assim um aço de boas propriedades em temperaturas elevadas (CARDARELLI, 2008). Esta composição está mostrada na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

**Tabela 1 – Composição química do aço AISI H13**

Elemento	Composição (%)
Cromo, Cr	4,75 - 5,50
Molibdênio, Mo	1,10 - 1,75
Silício, Si	0,80 - 1,20
Vanádio, V	0,80 - 1,20
Carbono, C	0,32 - 0,45
Níquel, Ni	0,3
Cobre, Cu	0,25
Manganês, Mn	0,20 - 0,50
Fósforo, P	0,03
Enxofre, S	0,03

Fonte – (AZOM, 2003)

(VILLARES METALS, 2006) Outros aços similares e/ou com normas diferentes do AISI de classificação também estão listados a seguir.

- ASTM A611 Tipo H13;

- ABNT H13;
- AISI H13;
- DIN X 40 CrMoV 5 1e WNr 1.2344;
- BS 4659: 1971 Tipo H13;
- JIS G 4404-72 Tipo SKD61.

(BOHLER UDDEHOLM, 2013) Suas principais características são:

- Boa resistência a alta temperatura e a fadiga térmica;
- Alta estabilidade dimensional durante tratamentos térmicos;
- Alta capacidade de usinagem;
- Alta dureza e ductilidade;
- Excelentes propriedades quando temperados.

Essas propriedades levam este aço a ser utilizado em matrizes e punções de forjamento em prensa, punção de ligas não ferrosas, moldes de fundição, matrizes de fundição sob pressão de alumínio, matrizes de extrusão de alumínio e facas para corte a quente. (VILLARES METALS, 2011)

Outras propriedades mecânicas e térmicas deste aço a ser estudado estão na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

**Tabela 2 –Propriedades mecânicas e térmicas do aço AISI H13**

<b>Propriedades do aço AISI H13</b>	
Módulo de Young	211 - 221 GPa
Módulo de cisalhamento	82 - 86 GPa
Coeficiente de Poisson	0,285 - 0,295
Fator de forma	15
Limite de escoamento (limite elástico)	1,61 – 1,69 GPa
Resistencia a tensão	1,94 – 2,04 GPa
Resistencia a compressão	1,61 – 1,69 GPa
Dureza (Rockwell C)	38 – 53
Resistencia a fadiga à 10 <sup>7</sup> ciclos	302 – 384
Temperatura de Fusão	1460 - 1500°C
Temperatura máxima de serviço	530 - 580°C
Temperatura mínima de serviço	-73 - -53°C
Condutividade térmica	27,5 - 29,8 W/m.°C
Coeficiente de expansão térmica	10,2 - 10,7 kJ/kg

Fonte - (“CES Edupack”, 2013)

## 2.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS

Tratamento térmico visa alterar propriedades mecânicas dos aços sem ocorrer alteração na composição. Para que isso ocorra, o aço é submetido a aquecimentos e resfriamentos controlados, em função do tempo e atmosfera que o aço foi submetido. Estas mudanças de propriedades estão diretamente ligadas à sua estrutura. (CHIAVERINI, 2012)

A arte e a ciência do tratamento térmico dos aços são baseadas na existência da fase austenítica, presente no diagrama Fe-C. O controle da transformação da fase austenítica em outras fases é a responsável pela obtenção de variadas estruturas e propriedades dos aços, graças a diversas formas alotrópicas que o ferro pode apresentar em diferentes temperaturas. (FREITAS, 2014)

Existem vários processos de tratamentos térmicos, que envolvem o material como um todo, tratamentos localizados em algum ponto, ou até mesmo tratamentos de superfície.

### 2.2.1 Têmpera

O processo de têmpera (ou do inglês *quenching*) consiste em um aquecimento do aço acima do ponto de austenitização. Após o tempo de homogeneização, o aço é então submetido a um choque térmico, colocando-o em algum ambiente de temperatura mais baixa como, por exemplo, óleo, água ou até mesmo o ar. O resultado é um aço com uma maior dureza e outras propriedades que, dependendo da aplicação, são mais satisfatórias.

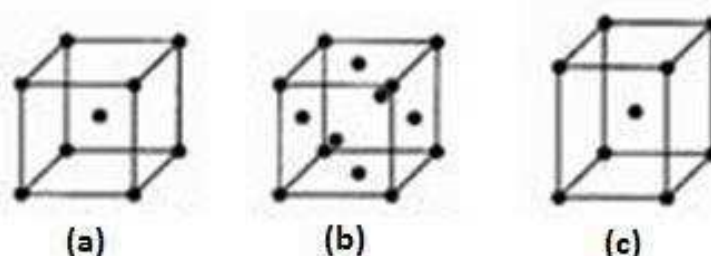
Esta mudança ocorre devido a uma mudança na estrutura do aço. Os aços, a temperatura ambiente, geralmente possuem uma microestrutura de duas fases, consistido de ferrita (ferro  $\alpha$ ) e perlita, formando o aço chamado de hipoeutetóide, ou perlita e cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ , ou carboneto de ferro), conhecidos como aço hipereutetóide. A diferença dos aços hipoeutetóide e hipereutetóide ocorre devido a concentração de carbono em sua estrutura. Aços com composição de carbono abaixo de aproximadamente 0,76%p (percentual do peso) são denominados de aços hipoeutetóides, e acima disso são chamados de hipereutetóides. Isso é válido



apenas para aços carbono, já que aços com outros elementos tendem a variar este ponto eutetóide, para mais ou para menos.

A ferrita possui uma estrutura cristalina que é chamada de cúbica de corpo centrado (CCC). Esta estrutura possui pequena solubilidade de carbono, que não ultrapassa 0,022%p à 727°C, por isso a formação de uma outra estrutura no material (a perlita). A perlita é constituída de uma mistura lamelar de cementita e ferrita, e a cementita aparece devido a adição de carbono no aço. (TOTTEN, G. E.; BATES, C. E.; CLINTON, 1993)

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** exibe as estruturas cristalinas que estão presentes no material durante o tratamento térmico.



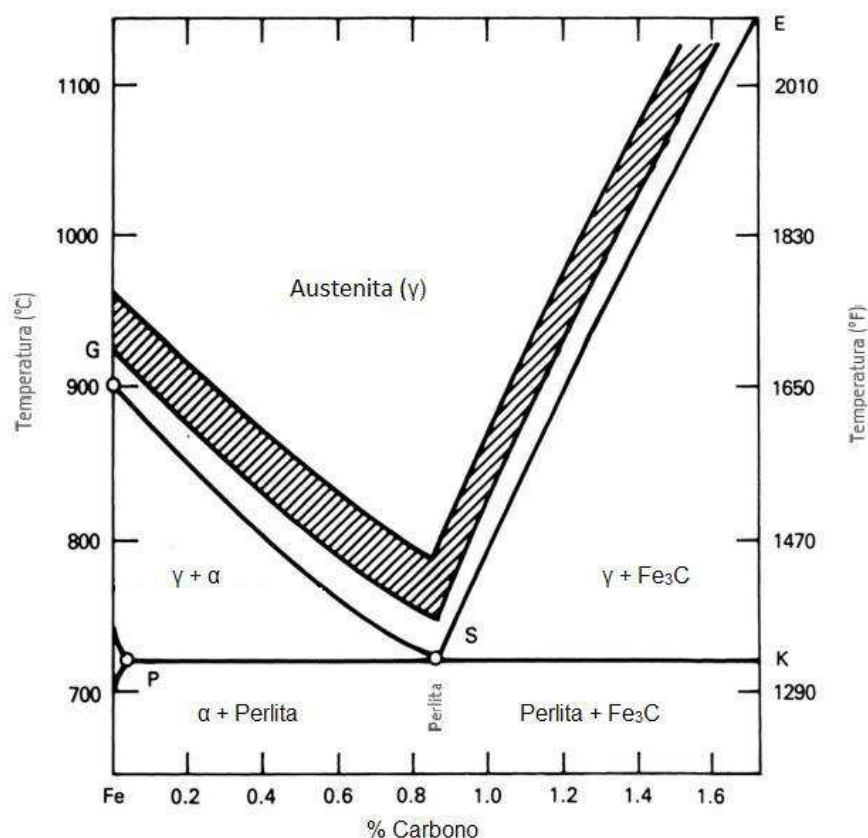
**Figura 1 - Estruturas cristalinas (a): cúbica de corpo centrado (CCC), (b): cúbica de face centrada (CFC) e (c): tetragonal de corpo centrado (TCC)**  
 Fonte – Adaptado de (“Estrutura Cristalina”, 2008)

Em determinadas temperaturas, em aços hipoeutetóides, a perlita começa a se decompor em ferrita com estrutura CFC (cúbica de face centrada) e uma outra estrutura, denominada austenita, também conhecida como ferro  $\gamma$ . Isso ocorre devido a estabilidade das fases nas temperaturas, ou seja, em baixas temperaturas o cristal CCC é mais estável, porém em altas temperaturas, o cristal CFC acaba ficando com maior estabilidade termodinâmica, ocasionando a mudança de estrutura por difusão. A medida que esta temperatura aumenta, aumenta a quantidade de austenita e diminui a quantidade de ferrita na estrutura, até que não se tem mais a estrutura ferrítica no material. Esta temperatura é chamada de temperatura de austenização.

Já em aços hipereutetóides, ocorre a decomposição da perlita em austenita, e uma outra estrutura, que contém cementita, na qual já estava presente na estrutura, e austenita. Analogamente aos hipoeutetóides, aumentando a temperatura diminui-se a quantidade de cementita e aumenta-se a quantidade de austenita até

que a microestrutura do material fique em austenita por completo, em uma temperatura também chamada de austenização.

Uma parte do diagrama de fases Fe-C está demonstrada na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, mostrando as transformações de fases discutidas.



**Figura 2 - Diagrama de fases Fe-Fe<sub>3</sub>C, demonstrando a mudança de fases na temperatura de austenização**

**Fonte – Adaptado de (TOTTEN, G. E.; BATES, C. E.; CLINTON, 1993)**

Conforme mostrado nesta figura, pode-se notar que com a mudança do teor de carbono no material, muda-se a temperatura de austenização. Composições mais próximas do ponto eutetóide (0,76%p de Carbono) apresentam menores temperaturas, e quando essa composição se distancia deste ponto, a temperatura aumenta.

É importante não deixar a temperatura utilizada ser muito baixa, evitando a dissolução dos carbonetos e, ao mesmo tempo, não deixar com que seja muito alta, causando um aumento do tamanho dos grãos presentes na estrutura. Por este

motivo a temperatura usual para estes materiais está mostrada na parte escura da **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

O procedimento realizado para o tratamento térmico de um aço se inicia ao aquecer da temperatura ambiente, utilizando uma rampa de aquecimento, até chegar a temperatura de austenização. Quando é chegado nesta temperatura, é necessário ocorrer a homogeneização desta temperatura por toda a extensão do componente. Usualmente é utilizado a seguinte regra: Uma hora por polegada de espessura, ou seja, de distância de qualquer parte da superfície que irá entrar em contato com a atmosfera.

Tendo ocorrido a austenização completa do material, o material é submetido a uma brusca queda de temperatura, quando colocado em água, óleo, sais ou ar. Estes ambientes são definidos pelo tipo de aço a ser tratado, pois alguns necessitam serem tratados com uma maior velocidade, ou taxas de resfriamento (utilizando água, na maioria das vezes), e outros necessitam de menores, utilizando óleos ou ar. O importante é que esta queda de temperatura seja acima da velocidade crítica, para ocorrer a formação de martensita. (GRACIOSO, 2003)

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** demonstra esquematicamente a tratamento que o aço é submetido em função do tempo.

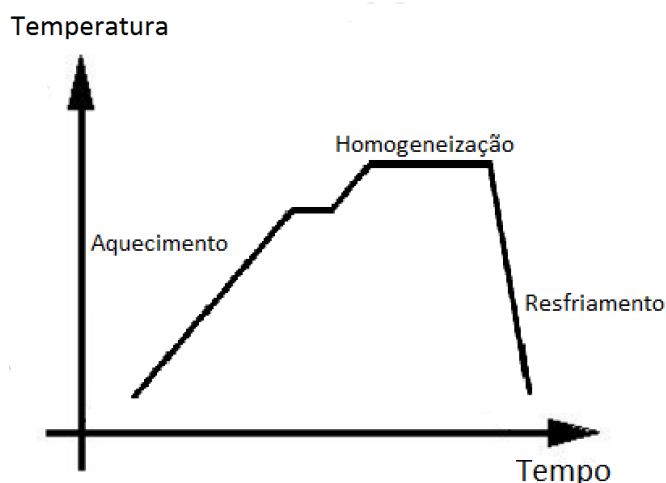


Figura 3 - Gráfico Temperatura em função do Tempo quando realizado a têmpera  
Fonte - Autoria própria

Este patamar apontado no gráfico no meio do aquecimento é utilizada para ajudar a homogeneização do material, evitando uma rampa de aquecimento muito íngreme.

Quando o material é resfriado acima da velocidade crítica, ao chegar em uma certa temperatura, ocorre uma abrupta mudança em sua estrutura, mudando-a para uma forma tetragonal (tetragonal de corpo centrado, ou TCC). Seguindo Kaushik Bhattacharya, ocorre certa distorção na rede cristalina, porém não ocorre difusão (ocorrendo quase instantaneamente), por isso os átomos ficam relativamente parados.

Os átomos de carbono constituem uma solução sólida supersaturada de carbono e por isso provoca certa distorção na rede CCC, promovendo alta resistência ao escoamento (ASHBY; SHERCLIFF; CEBON, 2012). Esta nova estrutura é denominada martensita, e esta mudança de estrutura é chamada de transformação martensítica. Desta transformação acaba ocorrendo uma pequena expansão volumétrica.

Esta nova fase é metaestável e por esta razão esta estrutura não aparece do diagrama Fe-C. Seus grãos possuem formas agulhadas e, se o material for aquecido novamente a temperatura de austenização e mantida por um tempo, ocorre a mudança desta estrutura para a austenita novamente. Esta estrutura agulhada está demonstrada na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

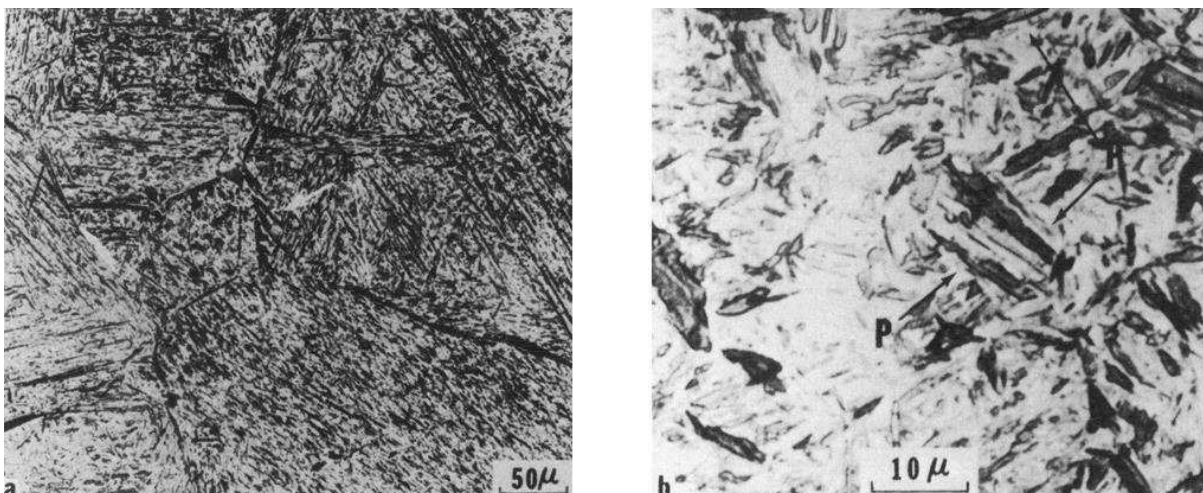


Figura 4 - Micrografia óptica mostrando a morfologia da martensita e seus tamanhos de grãos de acordo com a temperatura de austenização: (a) 1200 à 780°C e (b) 780°C  
Fonte - (LAI et al., 1974)

Para definir a velocidade crítica, geralmente é utilizado um gráfico comumente chamado de curva TTT (Tempo-Temperatura-Transformação), na qual se consegue observar a velocidade de resfriamento necessária para que ocorra a têmpera. Um exemplo desta curva está na Figura 5.

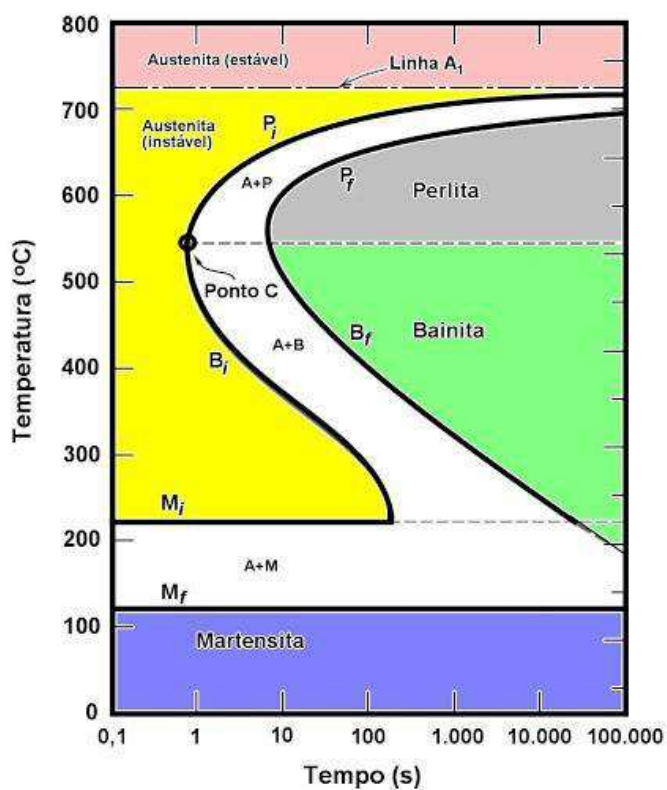


Figura 5 - Curva TTT do aço 52100  
Fonte - (“Curvas TTT - The Knife Network Forums : Knife Making Discussions”, 2010)

Observando esta figura, pode-se chegar à conclusão que a temperatura de austenização deste aço é de aproximadamente 720°C, pois forma a fase austenítica (parte superior da figura 5, acima da linha A<sub>1</sub>). A partir deste ponto tem-se o resfriamento, e para formar a estrutura Martensítica, ela deve chegar ao ponto C antes de cruzar a linha mostrada, ou seja, em aproximadamente 2 segundos. Deve também chegar na temperatura de formação total da Martensita (linha M<sub>f</sub>) que, neste caso, fica próximo a 120°C, antes de cruzar esta mesma linha. Logo, a velocidade crítica para este aço é de aproximadamente 46°C/sec, caso for considerado um resfriamento constante. Mudanças nas velocidades de resfriamento podem formar outras estruturas, como por exemplo a bainita, que podem ser mais vantajosas, dependendo da utilização do material, mas já que não ocorre a formação da martensita, o processo não pode ser denominado têmpera.

### 2.2.2 Revenimento

O processo de Revenimento (ou do inglês *Tempering*) é um tratamento térmico realizado em materiais que já se passaram pela têmpera. Este processo é utilizado principalmente para aumentar a ductilidade do material, já que a estrutura martensítica apresenta uma maior fragilidade.

Este processo consiste em aquecer o material até uma temperatura mais baixa que a temperatura eutetóide, na qual é geralmente menor que 650°C, por um determinado tempo, eliminando assim algumas tensões causadas durante a têmpera (PIMENTA et al., 2007). Estas tensões são causadas pois a transformação martensítica acarreta em uma pequena expansão volumétrica. Já que o interior do material não está em contato direto com a temperatura baixa, ocorre uma menor concentração de transformação martensítica no centro do componente em função da espessura do componente tratado. Assim, acaba ocorrendo forças trativas na superfície, enquanto que no centro forma-se forças compressivas.(PENHA; VENDRAMIM; CANALE, 2011)

“Este processo envolve a segregação do carbono para os defeitos da rede e a precipitação dos carbonetos, a decomposição da austenita retida, e a recuperação e recristalização da estrutura martensítica” (SPEICH; LESLIE, 1972). Assim ocorre a

mudança da estrutura martensítica monofásica, na qual era supersaturada em carbono, para a estrutura denominada martensita revenida.

A martensita revenida apresenta uma matriz ferrítica com pequenas partículas estáveis de cementita distribuídas uniformemente nesta matriz. Assim, pode-se constatar que a martensita revenida apresenta quase a mesma dureza que a sua estrutura anterior, mas devido a sua matriz acaba apresentando uma significativa diferença em relação a sua tenacidade e ductilidade, além de aumentar a estabilidade da estrutura martensítica. (ASHBY; et al, 2012; CALLISTER, JR, 2008)

Esta mudança de estrutura martensítica para martensítica revenida ocorre por difusão. Logo, ao aumentar a temperatura ou o tempo de revenimento, ocorre a aceleração desta difusão, além de aumentar os grãos de cementita, causando assim o amolecimento do material. (ASHBY; et al, 2012) Ao aumentar muito esta temperatura (até uma temperatura próxima do eutetóide) e/ou aumentar o tempo de exposição a esta temperatura, ocorre a formação da cementita globulizada, na qual se constitui de grandes esferoides de cementita formada pela energia dada ao material. Devido ao tamanho destes esferoides, o material apresentará baixa dureza, porém será mais dúctil (CALLISTER, JR; RETHWISCH, 2014).

Além disso, o revenimento também apresenta uma propriedade importante: este processo pode executar uma mudança de fase austenita retida para martensita, melhorando as propriedades finais. A austenita retida é uma fase metaestável que se constitui de uma fase austenítica que acabou não sendo transformada quando submetido ao resfriamento. Com esta transformação, o aço adquire propriedades melhores, fazendo com que ele suporte maiores cargas.

### 2.2.3 Normalização

A normalização consiste em um processo térmico na qual o material é aquecido até uma temperatura um pouco acima da temperatura de austenização, e então é deixado resfriar ao ar. Este tratamento é realizado para reduzir as tensões residuais contidas no material. Estas tensões podem ser causadas por um possível processo de usinagem (estando assim principalmente concentradas em sua

superfície), ou encruamento, ou até mesmo tensões causadas no processo de formação e/ou conformação do material como, por exemplo, o forjamento.

Estas reduções de tensões acontecem porque ao aumentar a temperatura do material ocorre o favorecimento dos mecanismos de difusão do material, fazendo com que a estrutura deste permute para um estado menos tensionado, que é o estado mais estável. A dureza do componente após este tratamento é reduzida.

Esta dureza final também depende da taxa de resfriamento. Para resfriamentos um pouco mais rápidos, a dureza apresentada irá ser significativamente maior. Analogicamente, resfriamentos mais lentos, assim como utilizados em recozimentos, que consiste em resfriar o material dentro do próprio forno que foi aquecido, dando um tempo ainda maior para o material esfriar, apresentarão durezas mais baixas (PRAT; COSTA; RASLAN, 1999). Além disso, quando estiver sendo resfriado, o material deve ser colocado de modo que o ar possa circular livremente em todo o material. Caso ocorra alguma restrição, a normalização ficará com características mais próximas a um recozimento.

O processo de normalização, assim como o recozimento, geralmente antecede o processo de têmpera.

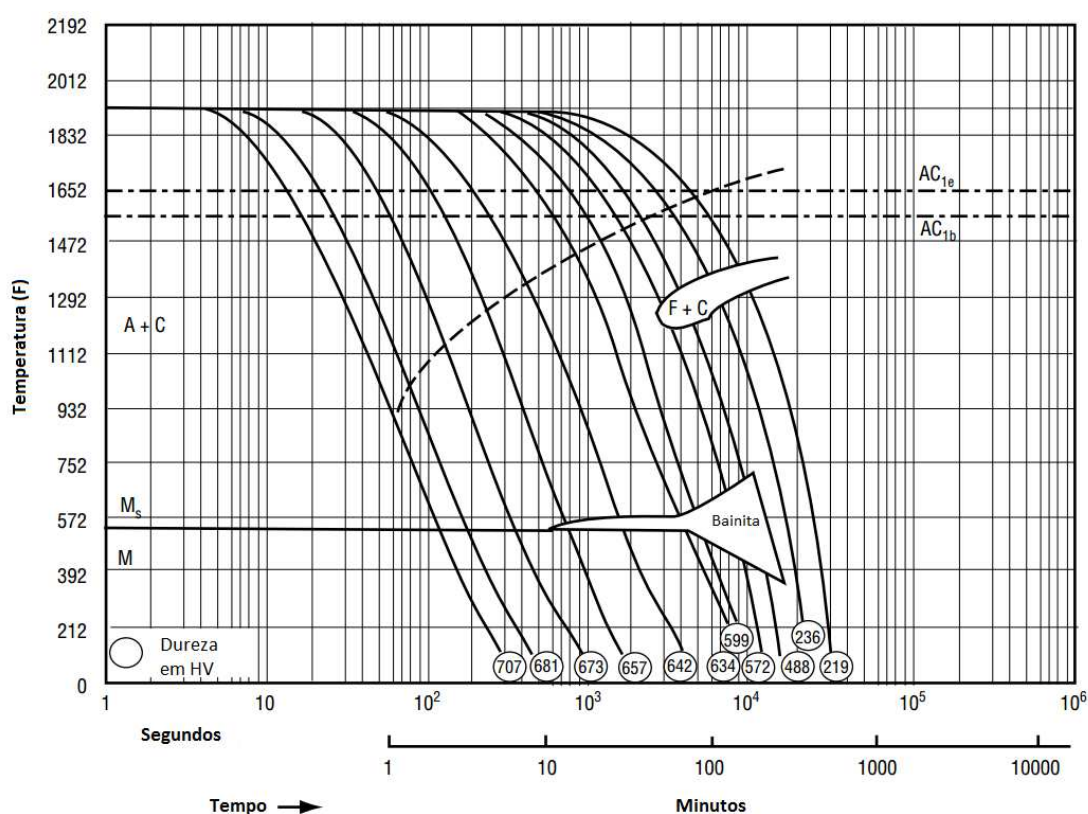
#### 2.2.4 Tratamentos Térmicos no Aço AISI H13

O aço H13, em suas extensas aplicações, é utilizado de forma tratada termicamente. Geralmente é passado por uma normalização, afim de retirar tensões residuais de sua estrutura causada pela usinagem; uma têmpera, aumentando assim suas propriedades mecânicas; e também por um, dois ou até três revenimentos, com o intuito de retirar as tensões térmicas causadas pelos processos anteriores.

A normalização do aço H13, tratamento que precede a têmpera, deve ser realizado em temperaturas próximas a de austenização. Maiores temperaturas e grandes tempos de exposição ao calor darão ao material uma menor tensão residual. Ordinariamente a temperatura utilizada varia entre 650 a 800°C. Depois desta temperatura chegar ao centro do componente, este deve ser resfriado ao ar, ou então, afim de diminuir ainda mais as tensões residuais, pode-se resfriar o objeto dentro do forno que foi aquecido, realizando assim o recozimento.



Para a têmpera, a temperatura de austenização usualmente varia 1010 a 1050°C. Estas diferentes temperaturas e tempos de exposição nesta temperatura podem resultar em algumas mudanças na estrutura, como o tamanho do grão e a dissolução dos carbonetos. Subsequentemente, deve ser mantido nesta temperatura até que se tenha a homogeneização completa. Este tempo de homogeneização dependerá da espessura do componente. Em seguida, o material é rapidamente retirado do forno na qual foi aquecido e submetido a um banho de óleo, cujo resultado será um choque térmico, temperando o aço. A curva de transformação do aço AISI H13 está demonstrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**



**Figura 6 - Curva "TTT" do aço AISI H13**  
**Fonte – Adaptado de (J. C. BENEDYK, 2008)**

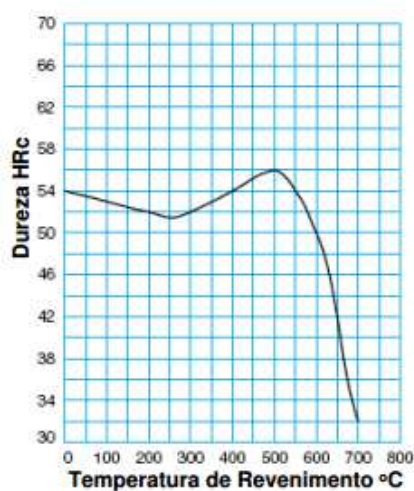
Segundo J. C. Benedyk, é necessário chegar a temperatura de 1000°F (537°C) em no mínimo 10 minutos para se começar a formar a estrutura bainítica. Em outras palavras, o aço H13 começa a apresentar estrutura bainítica quando a taxa de resfriamento estiver abaixo de 50°F/min (aproximadamente 28°C/min).

Após o material se resfriar ao óleo até uma temperatura próxima a 150°C, ele é retirado deste óleo e colocado novamente ao forno, para se proceder o

revenimento. É ideal que o material não chegue na temperatura ambiente depois de se realizar a têmpera e antes de suceder ao revenimento pois pode levar o material a um choque térmico muito alto: quando o aço H13 é resfriado da têmpera para a temperatura ambiente, é possível que ele apresente trincas devido ao tratamento. Para evitar isso, o aço é submetido ao revenimento antes de chegar nesta temperatura, aliviando as tensões da têmpera. Além disso, é recomendado que o óleo utilizado para o tratamento seja previamente aquecido até uma temperatura próxima de 80°C.

Para o revenimento, o aço é novamente aquecido, até uma temperatura próxima de 600°C. Esta temperatura pode também variar, dependendo do resultado de dureza que se quer obter. Como discutido anteriormente, aumentando a temperatura de revenimento diminui-se sua dureza e aumenta-se sua ductilidade. Novamente é necessário obter a homogeneização completa do material. Após a sua homogeneização, o aço é resfriado ao ar, ocorrendo assim a mudança da martensita monofásica para a martensita revenida.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta a mudança de dureza quando o aço é submetido a diferentes temperaturas de revenimento.



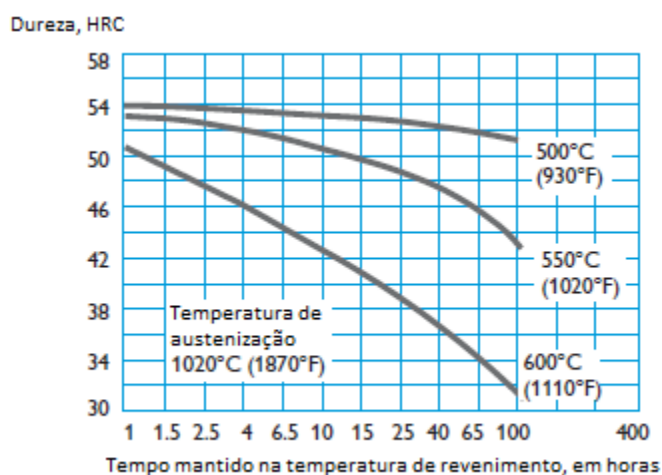
**Figura 7 - Influência da temperatura de revenimento para a dureza do aço AISI H13**  
Fonte - (SCHMOLZ; BICKENBACH, [s.d.]

Este aumento de dureza durante o intervalo de 250 a 500°C ocorre devido a austenita retida presente na estrutura do material. Ao se aumentar a temperatura de revenimento, coloca-se energia para ocorrer a transformação desta austenita retida

para martensita, aumentando assim sua dureza e outras propriedades. A brusca queda de dureza presente em temperaturas maiores que 500°C ocorre devido ao início da mudança da fase martensítica para fase austenítica novamente.

Outro fator importante no revenimento é o tempo de permanência nesta temperatura.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** exibe a diferença de dureza em relação ao tempo de permanência na temperatura de revenimento do aço H13.

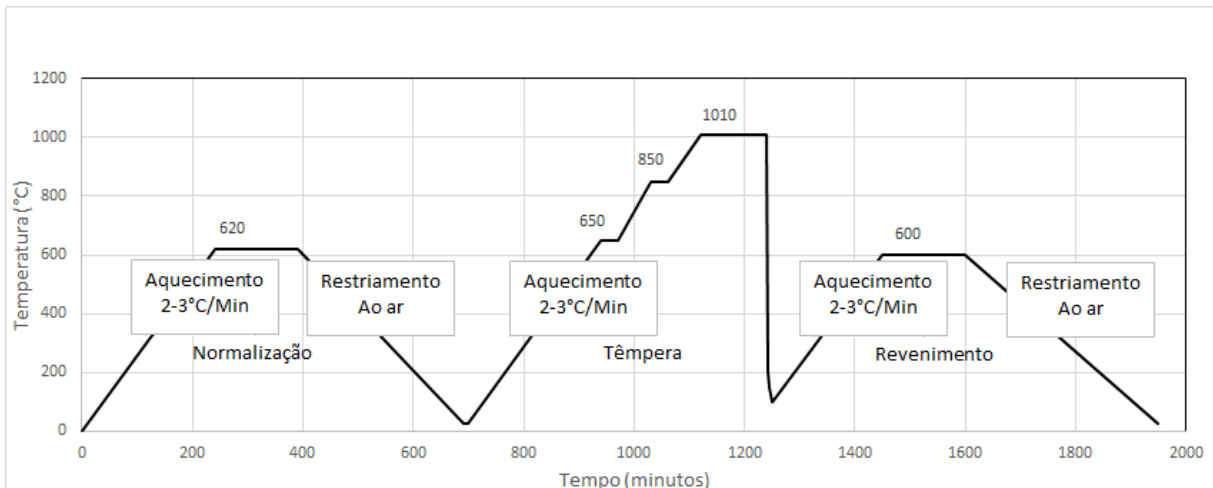


**Figura 8 - Influência do tempo de revenimento na dureza do aço AISI H13**  
Fonte – Adaptado de (BOHLER UDDEHOLM, 2013)

Nota-se que com o aumento do tempo de permanência nesta temperatura, ocorre uma queda de dureza conforme o tempo, principalmente em temperaturas de revenimento mais elevadas. Isso é ocasionado devido ao tempo e energia dada ao material para acontecer a mudança da martensita monofásica para martensita revenida. Maiores temperaturas oferecem mais energia e, conseqüentemente, uma queda mais acentuada na dureza.

Pode-se também realizar mais que um revenimento, aumentando ainda mais sua ductilidade, e diminuindo sua dureza. Estes posteriores revenimentos podem ou não apresentar temperaturas diferentes do revenimento inicial, isso irá novamente depender das propriedades necessárias.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta um exemplo de tratamento térmico realizado no aço H13.



**Figura 9 - Tratamento térmico realizado no aço AISI H13**  
**Fonte – Autoria própria**

Como pode-se notar na figura acima, a normalização utilizada não foi a normalização completa, pois não chega a temperatura de austenização. Porém, esta temperatura já consegue retirar boa parte das tensões causadas por uma possível usinagem no material feita antes de ser submetido ao tratamento. Por isso essa temperatura é muito utilizada em indústrias que utilizam o material.

A rampa de aquecimento para a têmpera também vale um destaque: é possível observar a presença de dois pontos na qual a temperatura foi mantida por um determinado período de tempo que, no caso, é de 30 minutos. Assim como discutido na seção de têmpera, estas duas pausas servem para ajudar na homogeneização da temperatura do material, evitando assim uma possível inércia térmica quando chega a temperatura de austenização.

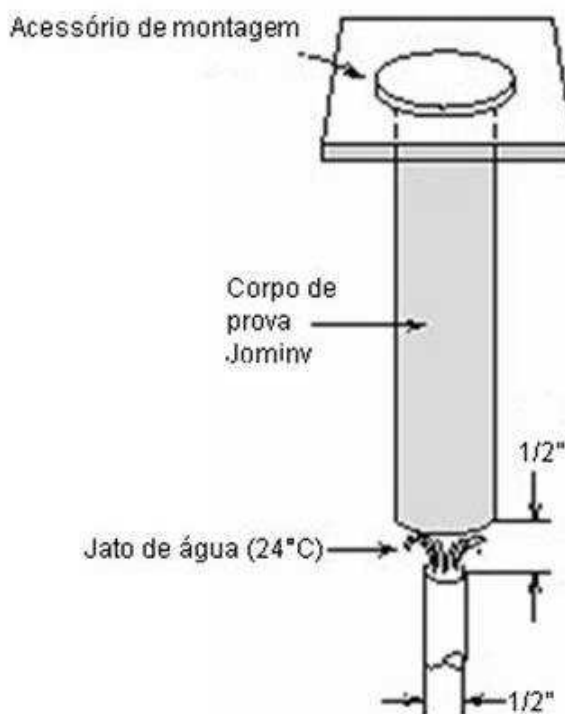
O resultado deste tratamento como proposto nesta figura idealmente é de uma dureza próxima a 52 HRC (dureza em rockwell C). Sendo realizado mais um revenimento neste material, a dureza cai para aproximadamente 48 HRC, em troca de um aumento de ductilidade.

### 2.3 ENSAIO JOMINY

O ensaio Jominy, também conhecido como *End-Quench test*, é um ensaio utilizado para determinar a temperabilidade de um aço. Consiste basicamente em realizar uma têmpera na base de um corpo de prova cilíndrico e depois medir a dureza da amostra em intervalos normalizados, formando assim uma curva de dureza, na qual a dureza máxima é gerada na base do corpo de prova, e esta dureza é diminuída conforme aumenta a distância da base.

Este ensaio é normalizado pela norma ASTM A-255 2010. Seguindo esta norma, antes de realizar o ensaio propriamente dito, a amostra (um corpo de prova cilíndrico de 1" de diâmetro, por 4" de altura) é anteriormente passada por uma normalização, sendo mantida na temperatura por 1 hora, seguida de um resfriamento no ar.

Após a normalização, a amostra é aquecida em posição vertical até a temperatura de normalização do aço a ser ensaiado, sendo mantido por 30 minutos. A atmosfera deve ser de um jeito a evitar a descarbonetação. A seguir, a amostra é rapidamente tirada do forno e colocada em um suporte já montado, na qual um jato de água atinge a base inferior do corpo de prova. O tempo de retirar do forno e começar o teste deve ser de no máximo 5 segundos e a temperatura da água deve estar de 5 a 30°C. Esta condição deverá ser mantida por no mínimo 10 minutos.(ASTM INTERNATIONAL, 2016) A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** demonstra um corpo de prova quando submetida ao ensaio.



**Figura 10 - Amostra quando submetida ao ensaio Jominy**  
**Fonte - (CALLISTER, JR, 2008)**

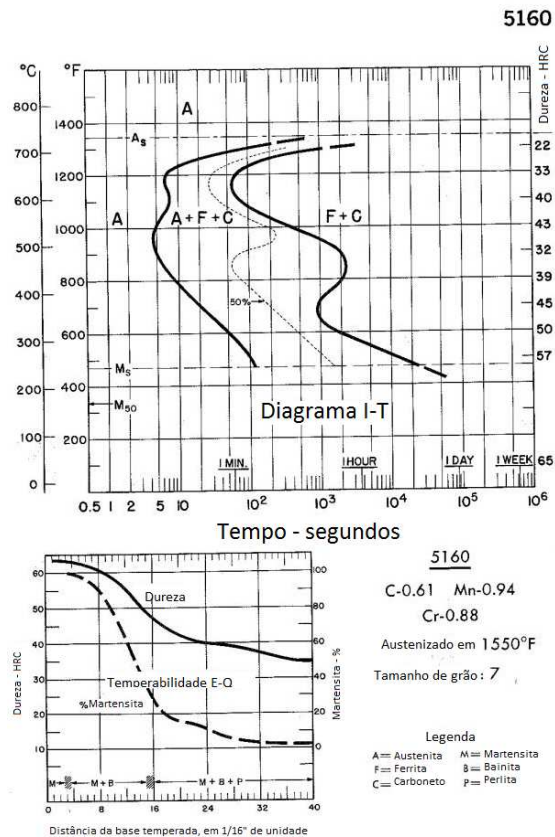
Quando este ensaio é executado desta forma, é formado um corpo de prova na qual sua base foi temperada, contendo alta dureza, já que quase sempre consiste em 100% martensita, e que gradualmente, conforme se distancia da base, sua dureza vai diminuindo. (CALLISTER, JR, 2008)

Para conseguir visualizar a temperabilidade do material, é realizado ensaios de dureza, em Rockwell C. A amostra deve ser retificada formando chanfros em duas laterais separadas em 180°, com uma profundidade de no mínimo 0,38mm, garantindo assim os resultados de dureza. As leituras de dureza devem ser realizadas em passos de 1,6mm (1/16") para as primeiras 16 leituras. Depois, em 18/16", 20/16", 22/16", 24/16", 28/16" e 32/16". Durezas abaixo de 20 HRC são descartadas, devido a imprecisão. Assim pode ser formada uma curva de endurecibilidade, na qual consiste em um gráfico de dureza em função da distância, seguindo a norma ASTM A255. Um exemplo de curva de endurecibilidade está dado na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**



Figura 11 - Exemplo de uma curva de endurecibilidade, contendo um corpo de prova  
 Fonte - (XAVIER, CARLOS ROBERTO, 2011)

Pode-se notar por esta figura a queda de dureza conforme a distância da base, diminuindo de aproximadamente 65HRC para 55HRC nos primeiros 25mm de distância. Isso ocorre devido ao tempo dado para a difusão do carbono, formando menos martensita no material e, conseqüentemente, menor dureza. Por ser resultado direto do tratamento térmico com relação ao tempo, é comum a curva de endurecibilidade estar junto com o diagrama TTT do material. Um exemplo disso está na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, onde se apresenta o diagrama I-T e, logo abaixo, a curva de endurecibilidade do aço 5160.



**Figura 12 -- Diagrama I-T junto com a curva de endurecibilidade do aço 5160**  
**Fonte – Adaptado de (MILLER, 2013)**

## 2.4 METALOGRAFIA

A metalografia apresenta como objetivo a preparação da amostra para uma posterior análise microscópica. Nesta etapa, é certificado que a estrutura do material é conservada desde o corte inicial até o fim. Para isso, são realizados alguns passos, que são dados a seguir.

- Corte;
- Embutimento (não necessário);
- Lixamento e polimento / Polimento eletrolítico;
- Ataque com algum reagente;
- Microscopia óptica.



Este trabalho irá relatar os processos mais comuns utilizados, que são o corte, embutimento, lixamento e polimento convencional, o ataque seguido pela microscopia óptica.

#### 2.4.1 Corte

O corte inicial serve para reduzir a amostra a um tamanho ideal, partindo de uma amostra de um tamanho grande. Um corte realizado de maneira errada pode levar a um resultado e conclusões erradas, devido a algum dano causado na estrutura visível.

Para evitar este dano, é necessário saber o método adequado e qual o material utilizado. Em algumas amostras, o dano superficial pode ser retirado posteriormente com o lixamento e polimento.

O método mais comum é utilizando um disco de corte abrasivo. Porém pode-se também realizar o corte com uma serra, por usinagem não convencional (eletroerosão), entre outros. A vantagem do disco de corte é o seu custo benefício em relação aos outros, sendo que este apresenta um bom resultado final e seu rápido corte. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra uma cortadora metalográfica, onde é feito o corte de maneira ideal.



Figura 13 - Cortadora politriz metalográfica  
Fonte - (TECLAGO, 2016a)

Para se obter um resultado ideal no corte com o disco abrasivo, é necessário saber que é possível ocorrer erros devido a algumas variáveis, tais como a velocidade de giro do disco, a abrasão do disco e a refrigeração.

#### 2.4.2 Embutimento

O embutimento é basicamente uma camada polimérica feita para a amostra com o intuito de proteger a amostra, principalmente se esta apresentar quinas, e também serve para facilitar o manuseamento desta durante o lixamento e polimento. O embutimento, por mais que não seja obrigatório sua realização, é um processo que facilita os processos posteriores.

Para a realização do embutimento, normalmente é utilizado resinas termofixas, com a utilização de calor/pressão, ou termoplásticas, que é realizado com um catalizador e com tempo de cura a frio. Polímeros utilizados são, em sua maioria, a baquelite, como resina termofixa, e o poliestireno, como resina termoplástica.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** revela uma resina termoplástica, saindo de um molde de silicone, junto com a amostra.



**Figura 14 - Amostra após o embutimento com resina termoplástica**  
**Fonte - (TECLAGO, 2016b)**

### 2.4.3 Lixamento/Polimento

Após o corte, seguido ou não do embutimento, a amostra deve ser tratada em sua superfície de modo que não apresente riscos ou qualquer outro tipo de dano na superfície causado pelo corte.

Para isso, é utilizado uma superfície com partículas abrasivas. Usualmente é utilizado lixas d'água, com diferentes granulometrias, porém pode-se também utilizar lixas com partículas de diamante, na qual apresenta grande durabilidade, em troca de seu preço elevado.

Para se realizar a retirada dos danos da superfície com lixas, são utilizadas lixas inicialmente com granulometria baixa, e aumentando conforme se passa por elas. As amostras, ao serem lixadas, devem ser mantidas retas, ou seja, os riscos formados pela lixa devem ser em apenas um eixo. Além disso, ao se passar de uma lixa de certa granulometria para outra de granulometria maior, é necessário que a amostra gire 90° em relação aos riscos anteriores, sabendo que é necessário

remover todos os riscos da lixa anterior para que se possa passar para a próxima lixa.

Para ajudar no lixamento, pode-se utilizar uma politriz metalográfica ou pode-se realizar mecanicamente. Hodiernamente é comum se ter politriz metalográfica na qual se realiza o lixamento de forma mais automática, sem o auxílio humano. Estas máquinas oferecem resultados mais homogêneos e de forma mais rápida, devido a sua pressão constante dada na superfície da amostra como um todo.

Para o polimento, é utilizado a politriz metalográfica com um pano ou feltro de polimento. Com este pano, é utilizado alguma suspensão de alumina, apresentando  $1\mu\text{m}$  a  $0.05\mu\text{m}$  de diâmetro. O polimento serve para dar um acabamento final a superfície na qual irá ser submetida a microscopia, retirando assim a maior parte dos riscos feitos pela última lixa utilizada. O resultado final é uma amostra na qual apresenta uma superfície espelhada.

#### 2.4.4 Ataque químico

O ataque é realizado na superfície da amostra para revelar a microestrutura do material para uma microscopia. Este processo é necessário pois a superfície polida reflete a luz de forma uniforme, não revelando a microestrutura.

Para se obter um bom resultado, é necessário ter uma superfície sem danos e sem riscos, oferecidos por um bom polimento. Além disso, é necessário saber o que se quer observar na superfície. Dependendo da microestrutura apresentada, é ideal utilizar determinados reagentes. Dois dos mais utilizados são apresentados a seguir. (VAN DER VOORT, 2001)

- Nital: Mais utilizado em sua composição de 2%, ou seja, 2% de ácido nítrico e 98% de etanol, este reagente revela uma matriz ferrítica e martensítica. Reagente mais comum utilizado.
- Picral: Com sua composição de 4g de ácido pícrico a cada 100g de etanol, este reagente revela bem a estrutura cementita em aços ferríticos.

Segundo George, (2001), outros reagentes podem ser utilizados, principalmente quando a amostra for de aços ligados ou quando se quer revelar certos constituintes. (VAN DER VOORT, 2001)

Usualmente este ataque é feito de maneira submersa, ou seja, a superfície da amostra é submergida no reagente, ocorrendo a reação. Dependendo o material, do reagente e da concentração do ácido, o tempo de submersão pode variar.

Após o devido tempo para se realizar o ataque, é comum ao se retirar a amostra lavar esta em etanol puro e levar ela até um secador, retirando todo o reagente e deixando a amostra pronta para a microscopia. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** revela o jeito ideal de se realizar a secagem da amostra.

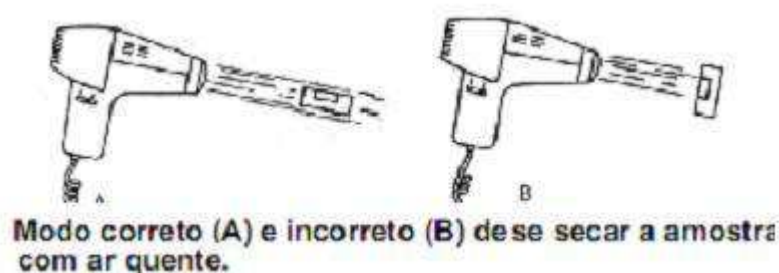


Figura 15 - Demonstração de como se deve secar a amostra com o ar quente  
Fonte - (CARDOSO, 2009)

Este procedimento de secagem deve ser realizado para que o etanol, ao evaporar, não deixe marcas na superfície, evaporando de forma homogênea.

#### 2.4.5 Microscopia óptica

Após o ataque, a amostra está pronta para ser analisada. Para isso, é utilizado um microscópio óptico. Estes microscópios usualmente conseguem atingir ampliações de até 1000 vezes. Basicamente, o microscópio óptico apresenta lentes em seu interior na qual a luz incidente que passa pela amostra é ampliada até chegar na ocular, mostrando assim uma imagem ampliada. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra um microscópio óptico.



**Figura 16 - Microscópio óptico invertido**  
**Fonte - (“Células de sangue sob o microscópio”, 2017)**

Após se obter as imagens, é necessário analisar o resultado obtido com referências bibliográficas de acordo com o que é necessário para cada situação. É possível também determinar a média dos tamanhos de grãos da amostra, na qual é seguida a norma ASTM E112.

### 3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO DE PESQUISA

#### 3.1 FLUXOGRAMA DE ATIVIDADES

Para uma visão resumida das atividades de metodologia, a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta um fluxograma com os passos e datas executados no trabalho.

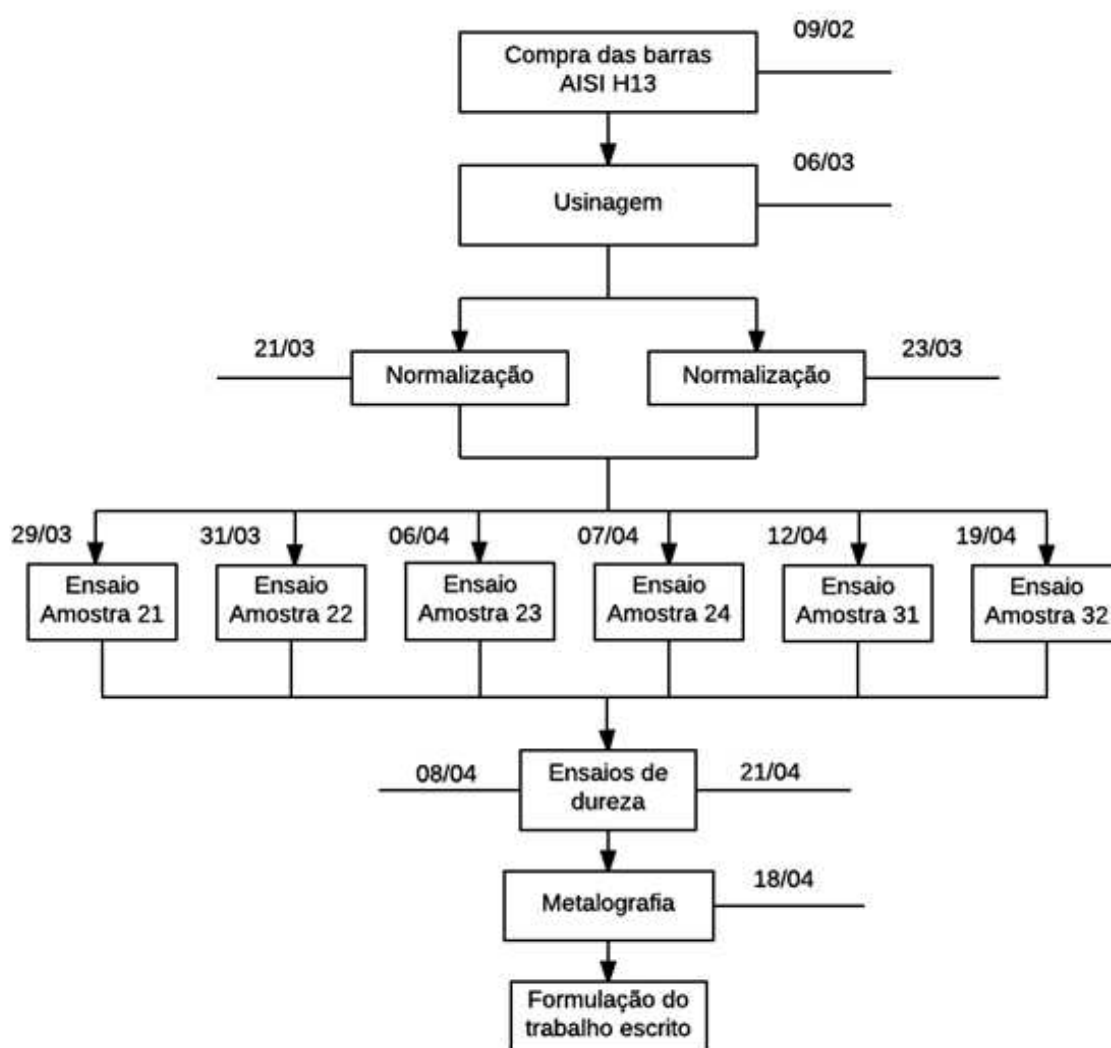


Figura 17 - Fluxograma do procedimento de realizado no experimento  
Fonte – Autoria Própria

## 3.2 MATERIAIS E VIDRARIAS UTILIZADAS

### 3.2.1 Ensaio Jominy

Para a realização do ensaio Jominy, foi utilizado os materiais/equipamentos listados a seguir.

- 10 amostras;
- Tipador numérico;
- Álcool gel;
- Grafite em pó;
- 1 Becker;
- Pincel;
- Forno JUNG modelo 1719;
- Aparato do ensaio Jominy;
- Durômetro MICRON NR;
- Centro de usinagem ROMI Discovery 760;
- Madeira;
- Paquímetro.

### 3.2.2 Metalografia

Já para a metalografia, os materiais utilizados estão listados a seguir.

- Cortadora metalográfica TECLAGO CM 100;
- Politriz lixadeira metalográfica TECLAGO PL 01D;
  - Lixas d'água de gramatura 320, 400 e 800;
  - Polimento metalográfico com pano de polimento e suspensões de alumina de 1 $\mu$ m;
- Traçador DIGIMESS;
- Microscópio óptico TECLAGO
  - Ocular: 10x; e
  - Objetivas: 10x, 20x, 40x, e 80x.
- Nital 3%.



### 3.3 METODOLOGIA

Inicialmente foi comprado uma barra de 1,10m do aço AISI H13, com diâmetro de 1,25". Em seguida, este material foi levado a um torno para se fazer o torneamento com o intuito de dar a forma final às amostras. O tamanho e forma das amostras seguiram a norma do ASTM A255-2014. O torneamento foi terceirizado.

Feito isso, as amostras foram separadas em 3 grupos, grupo 1, 2 e 3. Para o grupo 1 foi separado 4 amostras, nomeadas de 11, 12, 13 e 14, e que foram submetidas apenas para a normalização. Para o grupo 2, também foram separadas 4 amostras, nomeadas de 21, 22, 23 e 24, cuja finalidade foi realizar a normalização e o ensaio Jominy. Por fim, o grupo 3 foi separado 2 amostras, nomeadas de 31 e 32, na qual também foram realizadas a normalização seguido do ensaio Jominy, porém estas amostras foram submetidas aos ensaios de dureza antes e depois do ensaio Jominy, conseguindo assim ter uma melhor relação das diferenças de dureza entre a normalização e a têmpera provocada pelo ensaio. Esta quantidade de amostras se demonstrou ideal para se realizar, pois confere certa repetibilidade das análises. As amostras foram demarcadas com seus respectivos nomes com o uso do tipador numérico.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra a barra comprada, as amostras já torneadas e nomeadas, com seu tamanho ideal e, na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, as medidas ideais indicadas pela norma. Nota-se que a barra comprada apresentava as cores de identificação do aço H13, uma maneira também empregada para a identificação deste material após a sua obtenção.

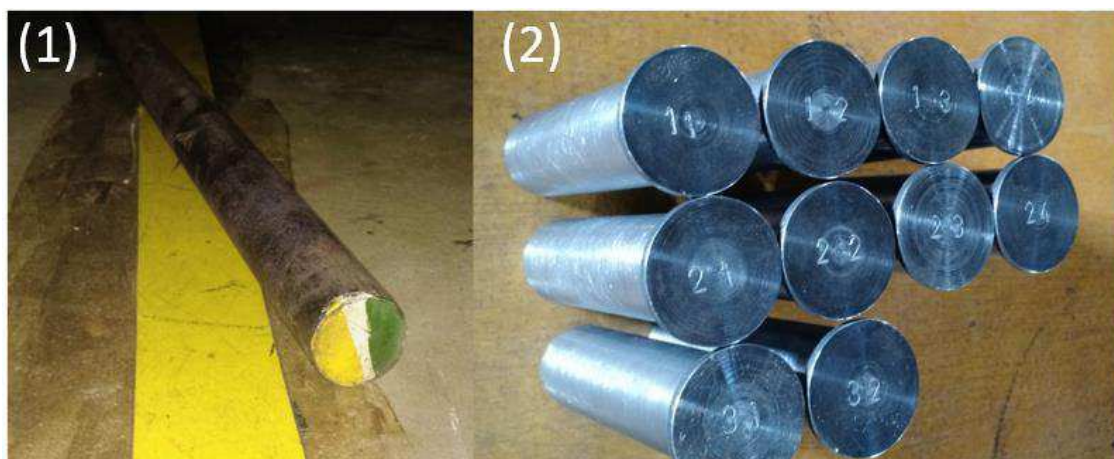


Figura 18 - Fotos do material utilizado (1): barra como comprada, e (2): material já usinado  
 Fonte – Autoria própria

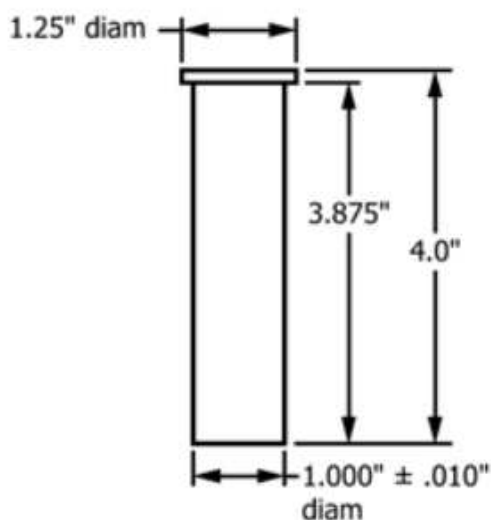
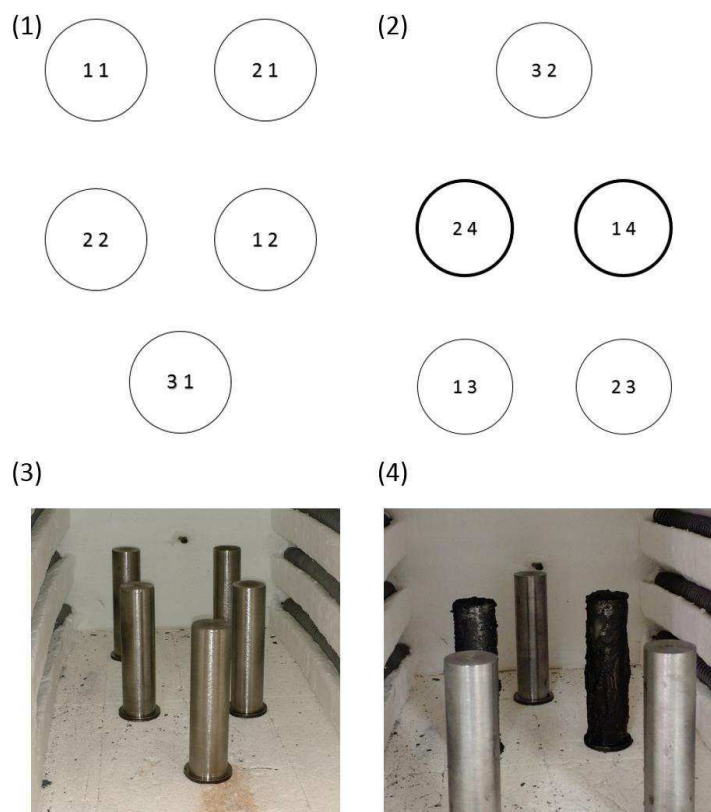


Figura 19 - Demonstração de como são as dimensões da amostra  
 Fonte - (ASTM INTERNATIONAL, 2016)

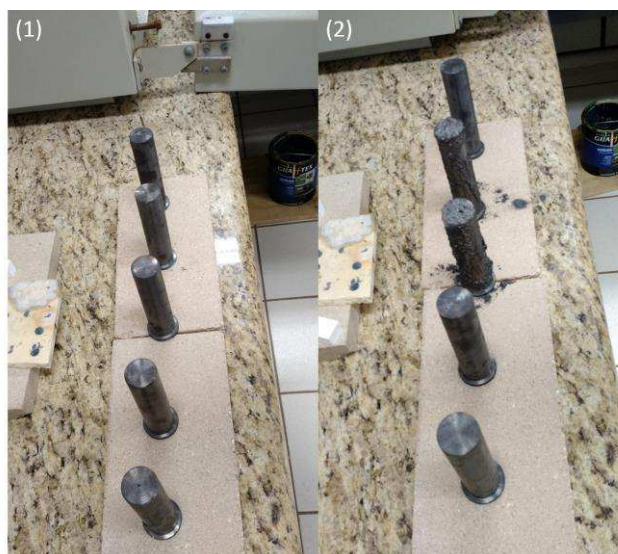
Com as amostras feitas, foi possível se realizar a normalização destas. Para isso, foi utilizado o forno JUNG modelo 1719. A normalização foi dividida em 2 partes, devido ao tamanho do forno, na qual coube 5 amostras com uma separação de aproximadamente 5 centímetros entre elas. A temperatura utilizada foi de 620°C, sendo mantido nesta temperatura por 1 hora, conforme escrito na norma ASTM

A255. Foi utilizada uma rampa de aquecimento de 2,1°C por minuto. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra esquematicamente como cada amostra foi colocada no forno e as imagens das amostras dentro do forno, logo antes de realizar a normalização. Já a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra as amostras, ainda aquecidas, quando retiradas do forno para seu resfriamento ao ar.



**Figura 20 -Imagens do material antes de ser normalizado. (1) e (2): Demonstração de como as amostras foram colocadas no forno, sendo as imagens respectivas à primeira e à segunda fornada, (3) e (4): Fotos das amostras dentro do forno, sendo as imagens respectivas à primeira e segunda fornada**

**Fonte – Autoria própria**



**Figura 21 - Fotos da amostra após retiradas da normalização (1): da primeira vez, e (2): da segunda vez**  
**Fonte – Autoria própria**

Para se ter uma comparação se ocorreu uma possível descarbonetação nas amostras durante a normalização, as amostras 14 e 24 foram cobertas por uma mistura de álcool gel com grafite em pó. Estas foram selecionadas somente por serem as últimas dos seus respectivos grupos, e não apresentam nenhuma diferença das outras. Esta mistura de composição aproximada de 30/70 de grafite/álcool em peso serve para evitar a descarbonetação do material. O álcool nesta mistura serve como aglutinante para o grafite, fazendo com o que a mistura fique na superfície da amostra. A composição desta mistura não precisa ser exata, mas precisa ser aproximada a um ponto em que o grafite se mantenha na superfície sem fluir com o tempo. Esta mistura foi feita no becker e sobreposta na amostra com um pincel. Esta mistura foi feita também para todas as amostras do grupo 2 e 3 antes do processo de austenização para o ensaio Jominy. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra uma amostra com esta mistura em sua superfície.



**Figura 22 - Amostra com a mistura álcool/grafite em sua superfície**  
**Fonte – Autoria Própria**

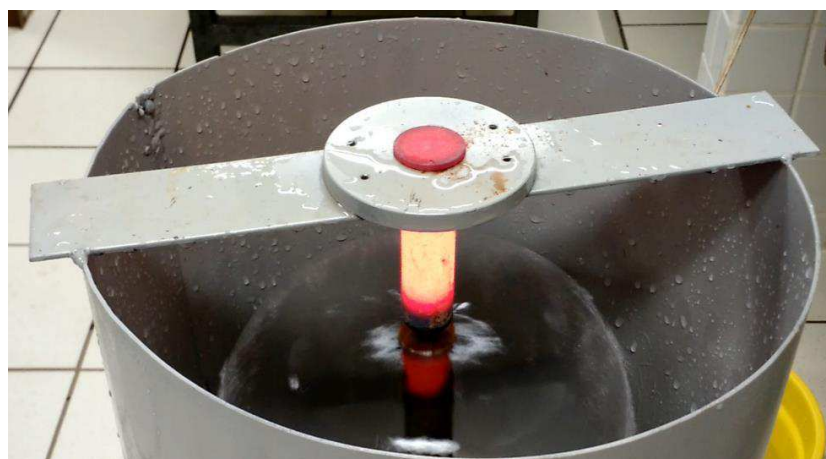
Esta mistura é um meio eficiente para evitar a descarbonetação sem precisar realizar alguma mudança na atmosfera como, por exemplo, o uso do vácuo.

Com a normalização feita as amostras do grupo 1 e 3 já estavam prontas para ir para os ensaios de dureza. As amostras do grupo 2 e grupo 3, após os ensaios de dureza prévio, foram submetidos ao ensaio Jominy. Para isso, foi adicionada à sua superfície da amostra a mistura de álcool e grafite e, em seguida, foi realizado um aquecimento de  $2,7^{\circ}\text{C}$  por minuto até  $1010^{\circ}\text{C}$ , na qual foi mantido nesta temperatura por 30 minutos, realizando assim a austenização. Após este tempo, a amostra foi retirada do forno e rapidamente colocada no aparato do ensaio Jominy. O tempo de retirada do forno até se colocar neste aparato foi de aproximadamente 5 segundos. Este processo se repetiu em todas as amostras. O ensaio foi realizado segundo as normas da ASTM A255. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra o

aparato do ensaio Jominy e a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** revela a amostra, logo depois de retirada do forno, sendo resfriada no aparato.



**Figura 23 - Aparato utilizado no ensaio Jominy**  
Fonte – Autoria Própria

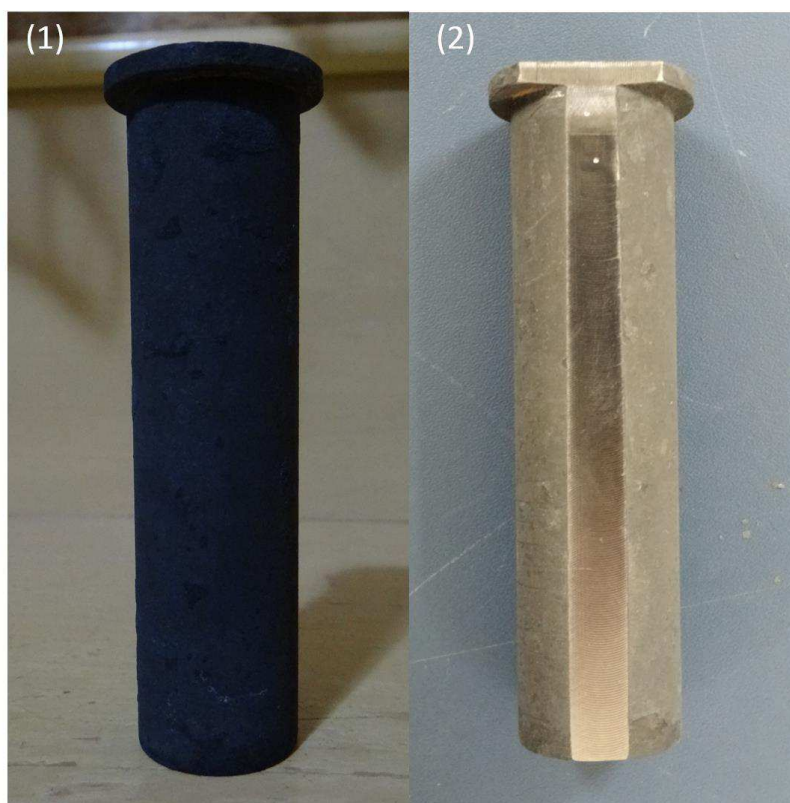


**Figura 24 - Amostra, ainda aquecida, sendo tratada no aparato do ensaio Jominy**  
Fonte – Autoria Própria

De acordo com a norma ASTM A255, o resfriamento exposto ao jato de água é de no mínimo 10 minutos, e o tempo deixado para o resfriamento nos ensaios foram de aproximadamente 20-25 minutos.

Após as amostras estarem respectivamente prontas, de acordo com seu grupo, estas foram submetidas ao centro de usinagem Discovery 760, com o intuito de usinar duas faces, separadas em 180° entre elas, para conseguir assim obter as

durezas da amostra sem a possível ocorrência de erro devido à descarbonetação. Segundo a norma ASTM A255, o mínimo de material retirado de cada face deve ser de 0,38mm, sendo que o retirado foi 0,6mm. Para demonstrar a diferença, a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** contém uma amostra sem a usinagem e outra com a usinagem. As amostras 31 e 32 foram usinadas antes do ensaio Jominy normalmente e, após o tratamento térmico, estas foram usinadas em perpendicular às faces já usinadas.



**Figura 25 - (1): amostra já tratada sem usinagem, e (2): amostra com usinagem**  
**Fonte – Autoria Própria**

Tendo realizado esta usinagem, as amostras foram submetidas aos ensaios de dureza. Para garantir o espaçamento necessário entre os ensaios declarado na norma ASTM A255, foi feito um acessório de madeira com um paquímetro, na qual este se prende na base do durômetro e serve de apoio para que a amostra, quando colocada no durômetro, não se mova no eixo Y. Para a movimentação no eixo X, um paquímetro foi colado neste suporte, sendo que ao abrir o paquímetro, a amostra, quando colocada devidamente no suporte, se move exatamente a mesma medida. Certificando as distâncias das medidas.

Devido a algumas calibrações necessárias no suporte feito, alguns ensaios de dureza próximo a base das amostras do grupo 1 não foram precisos, apresentando durezas imprecisas, e por este motivo alguns ensaios não estão completos. A Figura 26 e Figura 27 demonstram como o suporte foi posicionado na base do durômetro e realizado a dureza exata nos pontos determinados pela ASTM A255.





**Figura 26 – Foto demonstrando como o suporte funciona. A seta vermelha revela o movimento realizado para mover idealmente a amostra.  
Fonte – Autoria própria.**



**Figura 27 - Suporte sendo utilizado, revelando o resultado final.  
Fonte – Autoria própria.**

Já que as amostras do grupo 1 apresentaram durezas baixas, a ponto de sua dureza estar abaixo do recomendado para se ter uma dureza precisa em HRC, ou seja, abaixo de 20 HRC, estas foram medidas também em HRB. Esta medição foi

realizada na outra face, na qual previamente serviu de base para a realização dos ensaios de dureza.

Tendo realizado os ensaios de dureza, os resultados foram registrados para a construção da curva de endurecibilidade do material.

Para realizar a metalografia, aleatoriamente foi escolhida a amostra 23. Esta amostra foi cortada em 3 partes com o uso da cortadora metalográfica TECLAGO CM100, afim de se obter um tamanho ideal para a realização do experimento. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** demonstra como foi realizado este corte e como ficou a amostra depois.

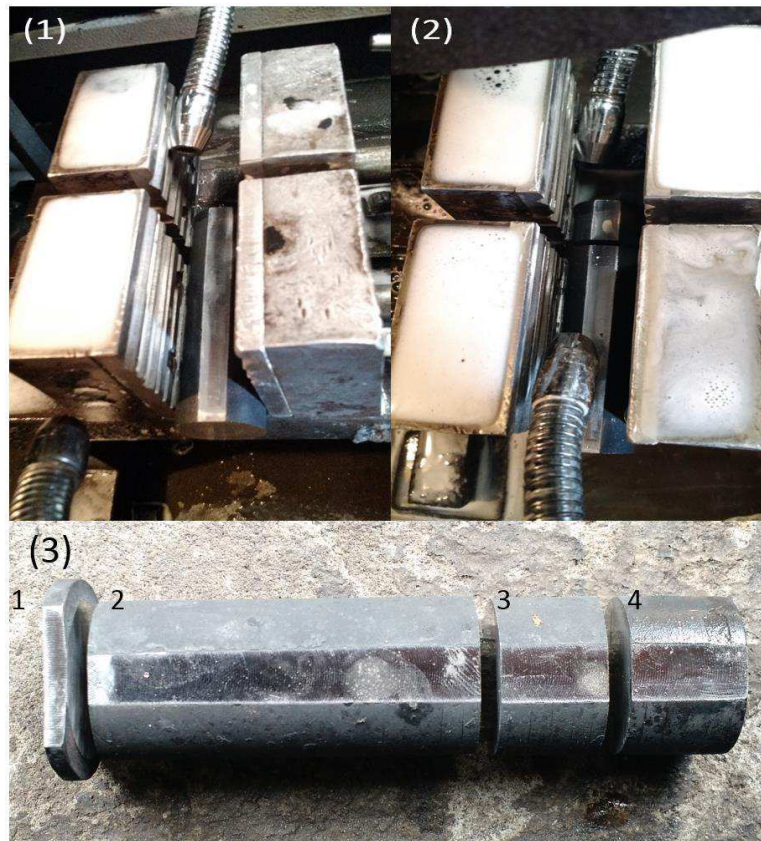
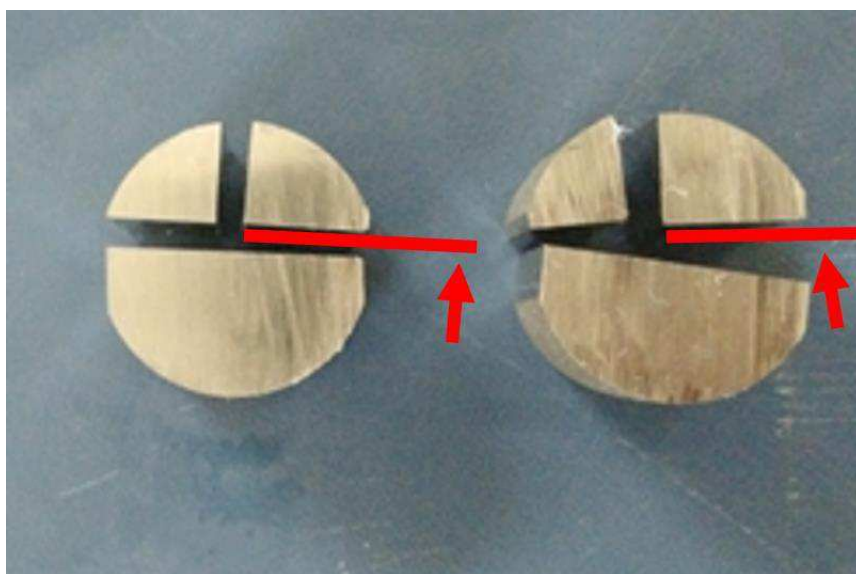


Figura 28 - Fotos demonstrando como a amostra foi cortada para a metalografia. (1): amostra antes de ser cortada, e (2): amostra após um corte, ainda na cortadora, e (3): Amostra após o corte

Fonte – Autoria Própria

Com estes quatro seguimentos do corpo de prova, foi utilizado as partes 3 e 4 para realizar novos cortes, para assim se obter o lugar ideal para se realizar a metalografia. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra como ficou o resultado final dos cortes e aonde foi realizado a metalografia. A parte 1 foi cortada apenas para que pudesse obter um fechamento ideal na cortadora, proporcionando assim um corte paralelo.

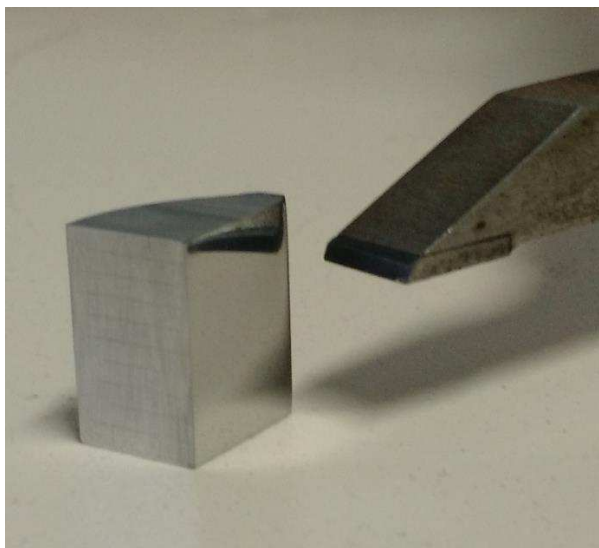


**Figura 29 - Demonstração de onde foi realizado a metalografia, após o corte final da amostra**  
**Fonte – Autoria Própria**

A altura do corte para a parte 4 foi de 17,46 mm e a da parte 3 foi de 16,41 mm e, destas partes cortadas, foi realizado traços nas medidas de onde foi realizado os ensaios de dureza, de 1/16" de distância entre eles, com a ajuda do traçador DIGIMESS. Estes traços foram feitos na lateral em perpendicular ao lado que foi feito a metalografia, e teve o propósito de ajudar na hora de se tirar as imagens da metalografia, nas regiões onde foram realizadas as medidas de dureza nos corpos de prova.

Com estes traços feitos, foi realizado o lixamento para o posterior polimento com alumina. Para isso, foi utilizado a polítrix lixadeira metalográfica TECLAGO PL 01D. As lixas utilizadas foram a de gramatura 320, seguida de 400 e posteriormente 800. Cada uma delas, ao acabar a anterior, era lixada de forma a formar 90° em

relação ao realizado com a lixa anterior, removendo por completo os riscos. Após passar pela lixa de gramatura 800, as amostras passaram pelo pano de polimento com suspensões de alumina de  $1\mu\text{m}$ , com o intuito de remover os finos riscos formados pela lixa 800. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra o acabamento da amostra após o lixamento, sem o polimento. Já a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra a mesma amostra, porém já realizado o polimento. Os ensaios de dureza foram feitos no lado esquerdo da superfície em que foi realizado o lixamento.



**Figura 30 - Amostra após ser lixada e traçada, antes de ser polida**  
**Fonte – Autoria Própria**



**Figura 31 - Amostra após ser lixada, traçada e polida. Pode-se notar a presença de carbonetos na superfície polida**

**Fonte – Autoria Própria**

Após o polimento, foram capturadas algumas imagens da amostra com o microscópio TECLAGO. Em seguida, estas foram submetidas ao ataque químico com Nital 3%, com o propósito de revelar a estrutura do material. Posteriormente, foram capturadas fotos com o microscópio em passos de  $2/16''$ , começando pelo  $1/16''$  de distância da base da amostra, até a distância de  $1\ 5/16''$ . Os traços feitos na lateral da amostra serviram de guia para a obtenção das imagens. Imagens a distância de  $11/16''$  da base não foram retiradas por estar muito perto da superfície em que foi cortada a amostra.

Com as fotos capturadas, foi utilizado as imagens obtidas nas distâncias da base tratada de  $1/16''$  e  $1\ 5/16''$  com ampliação de 400x a média do tamanho de grão, utilizando o programa ImageJ no computador, pelo método dos interceptos, na qual foi realizado da seguinte maneira: Foi traçado uma linha do tamanho exato ao tamanho da escala colocada na imagem, e em seguida estabelecido a medida da escala dada, determinando assim a escala para o programa. Em seguida, foi traçado uma linha qualquer, na qual o programa determinou o comprimento desta, e então foi contado a quantidade de grãos que foram interceptados pela linha. Com estes números, foi realizado a divisão do tamanho da linha com a quantidade de grãos

encontrados. Este processo foi repetido dez vezes nas duas imagens, realizando posteriormente a média dos números obtidos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

As análises foram feitas separadamente aos grupos 1 e 2, que foram previamente demarcadas com o tipador. Os resultados do grupo 3 foram acrescentados aos grupos 1 e 2. Para todas as amostras obtidas, quando comparadas com outras de seu grupo, obtiveram resultados semelhantes em relação a sua dureza.

Para o estudo metalográfico, a amostra escolhida para se obtenção das imagens foi a amostra 23, conforme descrito anteriormente. Esta foi escolhida aleatoriamente em função das amostras que já tinham obtidos seus ensaios de dureza no período, que eram, no caso, as amostras 21, 22 e 23.

As imagens obtidas pela microscopia óptica foram feitas próximas da superfície de onde foram demarcadas com os traços, minimizando assim possíveis erros de distância.

Durante a obtenção das imagens da metalografia, as escalas foram colocadas ao lado da imagem sem seguir um padrão. Além disso, para evitar redundâncias e imagens na qual não se consegue obter uma imagem clara de estrutura do material, as imagens obtidas de 100x, 200x e a maior parte das imagens em 400x não foram apresentadas neste trabalho. Não foi evidenciado nenhuma trinca durante a execução da micrografia.

#### 4.1.1 Amostras do ensaio Jominy

##### 4.1.1.1 Amostras normalizadas

As amostras do grupo 1 e grupo 3, na qual foram somente normalizadas, foram medidas em HRC e em seguida em HRB. As medidas obtidas dos ensaios em HRC estão representadas na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

**Tabela 3 - Durezas obtidas nas amostras normalizadas, em HRC**

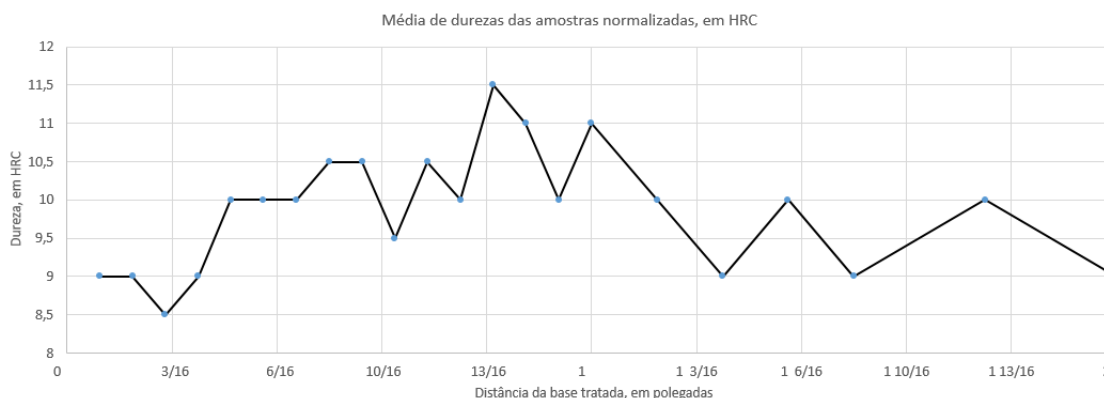
Distâncias da base	Durezas (HRC)						Média	Desvio padrão
	Amostra 11	Amostra 12	Amostra 13	Amostra 14	Amostra 31	Amostra 32		
1/16	-	-	9	-	-	-	9	-
2/16	-	7	12	7	9	9	9	2,05
3/16	9	6	11	6	8	9	8,5	1,94
4/16	10	9	9	9	9	10	9	0,52
5/16	11	10	11	10	9	9	10	0,89
6/16	11	10	10	10	9	10	10	0,63
7/16	11	9	11	9	10	10	10	0,89
8/16	10	11	10	11	11	9	10,5	0,82
9/16	11	12	9	12	10	10	10,5	1,21
10/16	9	9	10	9	11	10	9,5	0,82
11/16	10	12	9	12	11	9	10,5	1,38
12/16	10	12	9	12	10	9	10	1,37
13/16	11	12	10	12	12	9	11,5	1,26
14/16	12	11	13	11	10	11	11	1,03
15/16	11	10	10	10	9	10	10	0,63
1	11	11	10	11	9	11	11	0,84
1 2/16	9	10	10	10	10	10	10	0,41
1 4/16	9	9	10	9	9	9	9	0,41
1 6/16	9	10	10	10	10	10	10	0,41
1 8/16	9	9	7	9	10	10	9	1,10
1 12/16	13	10	10	10	11	10	10	1,21
2	10	9	11	9	9	9	9	0,84
Média	10	10	10	10	10	10	10	0

Fonte – Autoria Própria

Pode-se notar que a média de dureza em das amostras está em 10 HRC. Os pontos onde foram retirados as amostras variaram de 6 HRC, com duas ocorrências, até 13 HRC, com apenas uma ocorrência. Isto mostra que as amostras estavam relativamente homogêneas antes do tratamento com o ensaio Jominy, não afetando assim o resultado do ensaio. Estas diferenças de dureza podem também estar relacionado à alguma possível variação no momento de execução do ensaio de dureza. Para visualizar melhor os resultados, a média das durezas que foi obtida foi



plotada na Figura 32. Já o resultado obtido dos ensaios em HRB está na **Erro!**  
**Fonte de referência não encontrada..**



**Figura 32 - Média de dureza das amostras normalizadas em HRC**  
**Fonte - Autoria própria**

**Tabela 4 –Durezas obtidas nas amostras normalizadas, em HRB**

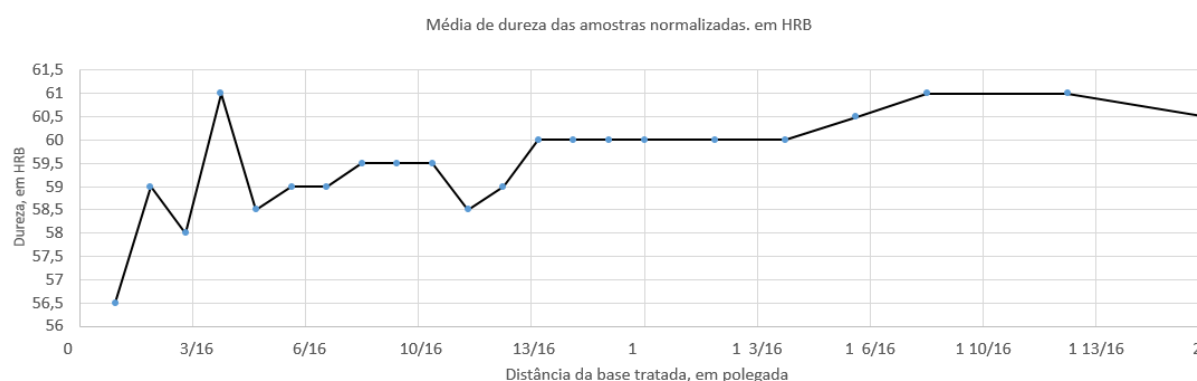
Distâncias da base	Durezas (HRB)						Média	Desvio padrão
	Amostra 11	Amostra 12	Amostra 13	Amostra 14	Amostra 31	Amostra 32		
1/16	56	57	-	-	-	-	56,5	0,71
2/16	59	59	60	-	-	-	59	0,58
3/16	59	57	60	-	57	58	58	1,30
4/16	58	61	62	-	55	61	61	2,88
5/16	59	58	61	58	58	61	58,5	1,47
6/16	60	59	59	59	58	60	59	0,75
7/16	60	59	58	59	59	59	59	0,63
8/16	58	60	60	60	58	59	59,5	0,98
9/16	58	59	60	59	58	58	58,5	0,82
10/16	57	59	60	60	58	62	59,5	1,75
11/16	58	60	59	62	58	55	58,5	2,34
12/16	59	61	59	59	58	57	59	1,33
13/16	60	62	56	62	60	55	60	2,99
14/16	63	60	51	60	60	57	60	4,14
15/16	61	60	63	60	60	56	60	2,28
1	60	60	62	61	60	57	60	1,67
1 2/16	59	60	61	60	61	58	60	1,17
1 4/16	60	59	60	60	61	56	60	1,75
1 6/16	60	61	59	61	62	57	60,5	1,79
1 8/16	61	61	60	62	63	56	61	2,43

1 12/16	60	61	61	62	64	58	61	2,00
2	62	61	60	60	62	59	60,5	1,21
Durezas (HRB) (continua)								
Distâncias da base	Amostra 11	Amostra 12	Amostra 13	Amostra 14	Amostra 31	Amostra 32	Média	Desvio Padrão
Média	59,5	60	60	60	59,5	58	59,75	0,77

**Fonte – Autoria Própria**

Com esta tabela, nota-se que também não ocorreu uma grande mudança de dureza em relação aos pontos, sabendo que é normal um material em um tratamento convencional apresentar uma variação de 3 HRC. A dureza obtida teve média entre 59 a 60 HRB. Isto aconteceu também na amostra 14, na qual foi colocada a mistura de grafite e gel. A ocorrência de pontos um pouco distantes destes foram: 51 HRB, aparecendo somente uma vez; 55 HRB, aparecendo três vezes; e 64 HRB, aparecendo apenas uma vez. Já que esta escala é a ideal para esta dureza obtida, em comparação com a em HRC, o resultado desta é mais próxima da real dureza da amostra.

Para uma melhor visualização destes resultados, estes foram colocados na Figura 33, que demonstra a média das durezas obtidas em HRB.



**Figura 33 - Média de dureza das amostras normalizadas em HRB**  
**Fonte - Autoria própria**

Com base neste gráfico, nota-se que o início apresenta algumas irregularidades, variando entre 56,5 e 61 HRB. Isto pode ser ocorrência de algum possível erro de calibração do dispositivo construído para este trabalho, além de

apresentar menor quantidade de dados. Isto pode ser visto de certa maneira também na Figura 32.

Sabendo disto, e considerando as durezas obtidas em HRC e em HRB, pode-se concluir que as durezas das amostras foram relativamente homogêneas e próximas de 60HRB, prezando as diferenças obtidas em pontos próximos da base. Além disso, pode-se notar que a presença de uma atmosfera que evite a decarbonetação (potencial de carbono no meio externo ao corpo de prova durante o aquecimento) não afetaram os ensaios de dureza, obtendo os mesmos números que quando não se apresentava esta atmosfera.

#### 4.1.1.2 Amostras utilizadas no ensaio Jominy

Após a análise de dureza do grupo 3, as amostras dos grupos 2 e 3 foram submetidos ao ensaio Jominy. As durezas obtidas foram plotadas na Tabela 5.

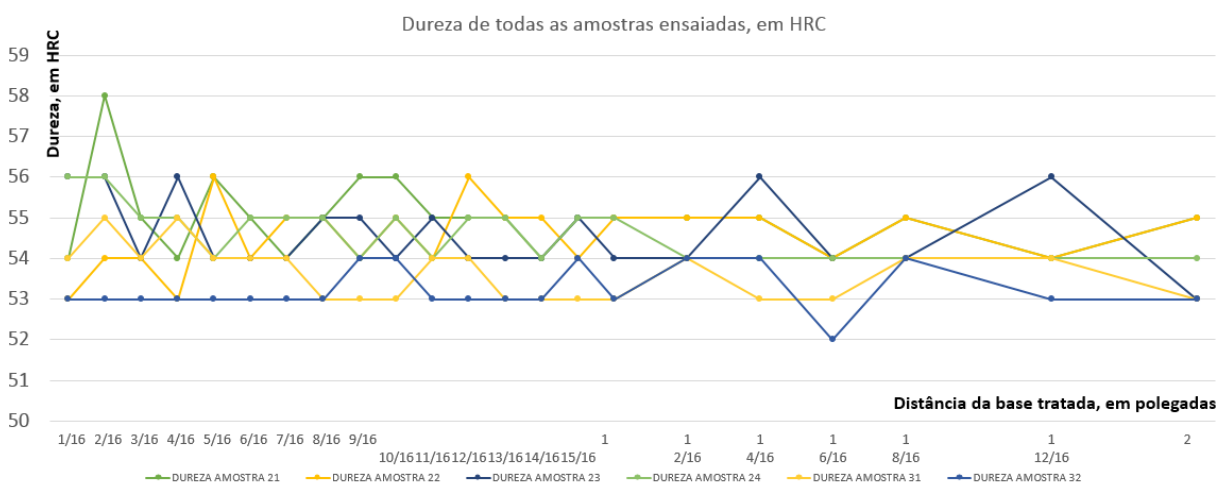
**Tabela 5 - Durezas obtidas das amostras submetidas ao ensaio Jominy.**

Distâncias da base	Durezas (HRC)						Média	Desvio padrão
	Amostra 21	Amostra 22	Amostra 23	Amostra 24	Amostra 31	Amostra 32		
1/16	54	53	56	56	54	53	54	1,37
2/16	58	54	56	56	55	53	55,5	1,75
3/16	55	54	54	55	54	53	54	0,75
4/16	54	53	56	55	55	53	54,5	1,21
5/16	56	56	54	54	54	53	54	1,22
6/16	55	54	54	55	54	53	54	0,75
7/16	54	55	54	55	54	53	54	0,75
8/16	55	55	55	55	53	53	55	1,03
9/16	56	54	55	54	53	54	54	1,03
10/16	56	55	54	55	53	54	54,5	1,05
11/16	55	54	55	54	54	53	54	0,75
12/16	55	56	54	55	54	53	54,5	1,05
13/16	55	55	54	55	53	53	54,5	0,98
14/16	54	55	54	54	53	53	54	0,75
15/16	55	54	55	55	53	54	54,5	0,82
1	55	55	54	55	53	53	54,5	0,98

1 2/16	55	55	54	54	54	54	54	0,52
1 4/16	55	55	56	54	53	54	54,5	1,05
Durezas (HRC) (continua)								
Distâncias da base	Amostra 21	Amostra 22	Amostra 23	Amostra 24	Amostra 31	Amostra 32	Média	Desvio Padrão
1 6/16	54	54	54	54	53	52	54	0,84
1 8/16	55	55	54	54	54	54	54	0,52
1 12/16	54	54	56	54	54	53	54	0,98
2	55	55	53	54	53	53	53,5	0,98
Média	55	55	54	55	54	53	54	0,82

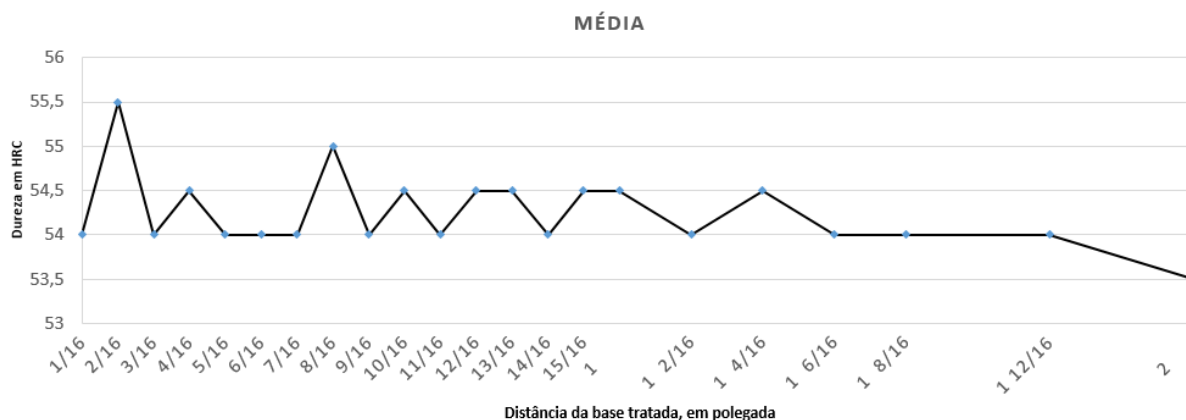
Fonte – Autoria própria.

Analisando os dados obtidos, constatou-se que a dureza obtida em todos os pontos se mantiveram próximos de 55 HRC. Para se ter uma visão mais ampla das diferenças de dureza, a Figura 34 mostra as durezas de todas as amostras, e como estas não tiveram uma variação elevada, mesmo depois de se ter distanciado da base que foi submetido o jato de água.



**Figura 34 - Durezas obtidas de todos os pontos ensaiados, em HRC.**  
Fonte - Autoria própria.

Consegue-se reparar que, com exceção de dois pontos, a dureza variou de 53 HRC a 56 HRC. Ainda, a Figura 35 mostra a média de dureza dos pontos obtidos, como mostrado na Tabela 5.



**Figura 35 - Média dos pontos ensaiados, em HRC.  
Fonte - Autoria própria.**

Já este gráfico tem-se a impressão de uma pequena queda de dureza de apenas 1 HRC desde a base até 2" de distância. Esta queda pode ou não ser um erro de medida, devido ao número de amostras não serem elevados. Contudo, devido a temperatura ficar elevada por mais tempo conforme se distanciava da base, é possível que esta queda de dureza, mesmo que pequena, tenha ocorrido no material. Este tempo de permanência em temperaturas elevadas fazem com que o grão do material aumente, diminuindo assim a resistência e a dureza do material. Além do grão, é possível ocorrer também uma maior dissolução dos carbonetos na estrutura. Esta queda de dureza pode ser observada na curva transformação tempo-temperatura do aço H13, mostrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Vale salientar que esta medida de 1 HRC está dentro do desvio padrão calculado, o que significa que estas medidas são fisicamente equivalentes.

Para se obter uma aproximação da taxa de resfriamento obtida no ensaio, é necessário saber que, seguindo registros feitos em vídeo dos ensaios, o tempo para a amostra escurecer em sua totalidade foi de aproximadamente 94 segundos, com erro de 2 segundos, para mais e para menos. Além disso, a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra as cores obtidas no material de acordo com a temperatura.



**Figura 36 - Cores dos metais relacionado a temperatura**  
Fonte - ("Tecnohard", 2011)

Considerando a temperatura 550°C (sabendo que é próximo a temperatura do início da transformação martensítica, como mostrada na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, chamada de linha  $M_s$ ), com um erro aproximado de 50°C, para mais e para menos, e o tempo de (94±2) segundos, pode-se realizar a aproximação da taxa de resfriamento, realizando as operações seguintes.

$$\Delta T = 1010^{\circ}\text{C} - 550^{\circ}\text{C} = 460^{\circ}\text{C} \quad (1)$$

$$\text{Taxa} = \frac{\Delta T}{t} = \frac{460^{\circ}\text{C}}{94\text{s}} = 4,89^{\circ}\text{C/s} \quad (2)$$

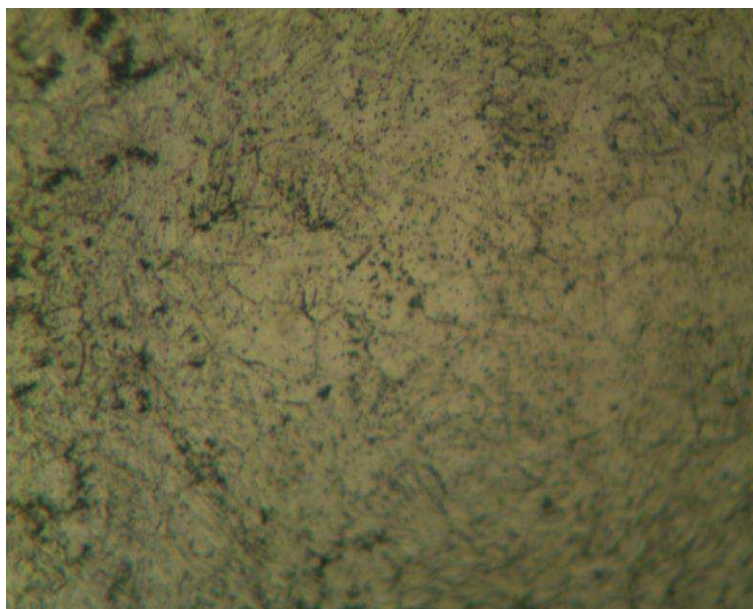
Fazendo a conversão de °C/s para °C/min, a taxa de resfriamento é de (293±40) °C/min.

Mesmo esta taxa sendo uma aproximação, e também considerando desta taxa ser constante, é possível verificar que a taxa de resfriamento realizada nos

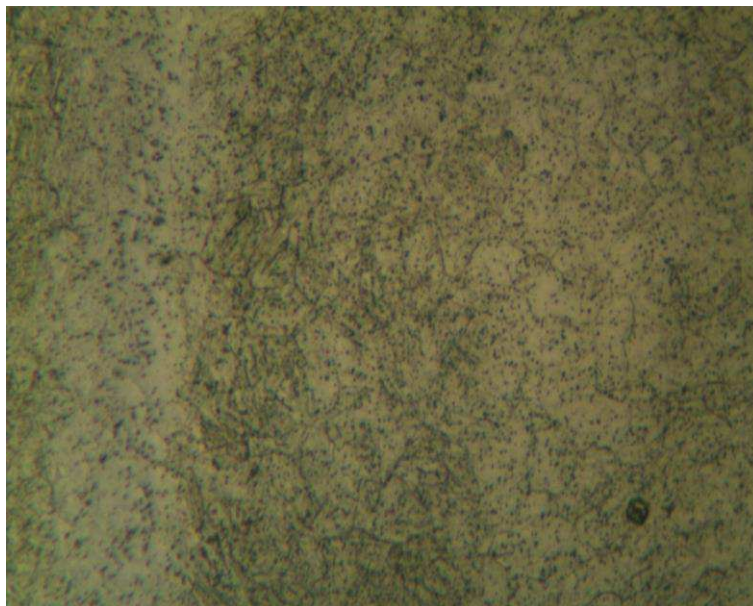
segmentos mais distantes da base da amostra é muito mais elevada para que se forme outra estrutura a não ser a estrutura martensítica.

#### 4.1.2 Metalografia

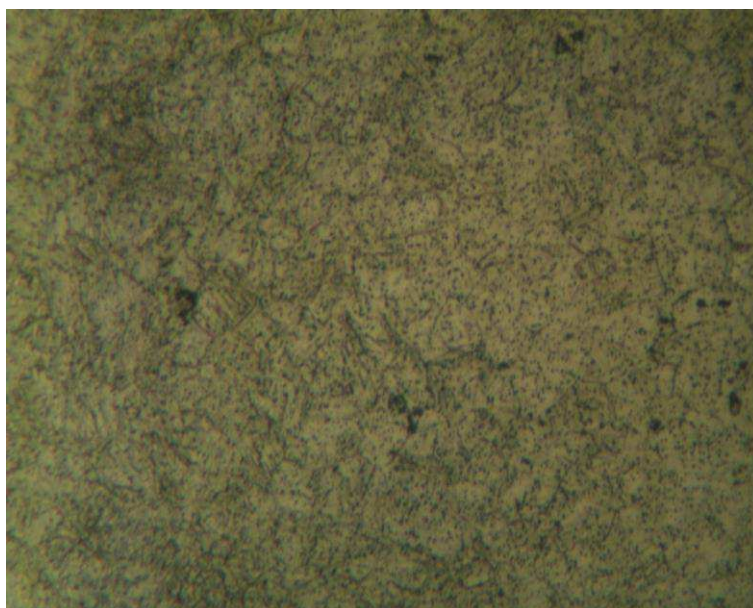
As figuras 37, 38, 39, 40 e 41 apresentam as microestruturas encontradas em distancias de 1/16", 3/16", 5/16", 7/16" e 9/16" de distância da base tratada, com um aumento de 800x. Estas imagens foram obtidas em apenas uma amostra.



**Figura 37 – Imagem da estrutura do material em uma distância de 1/16" da base. Aumento de 800x. Ataque Nital 3%  
Fonte – Autoria Própria**

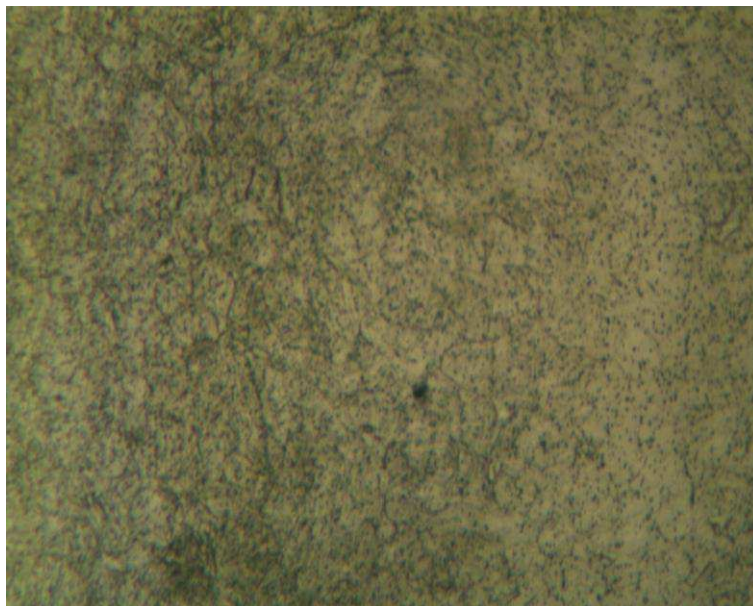


**Figura 38 - Imagem da estrutura do material em uma distância de 3/16" da base. Aumento de 800x. Ataque Nital 3%  
Fonte – Autoria Própria**

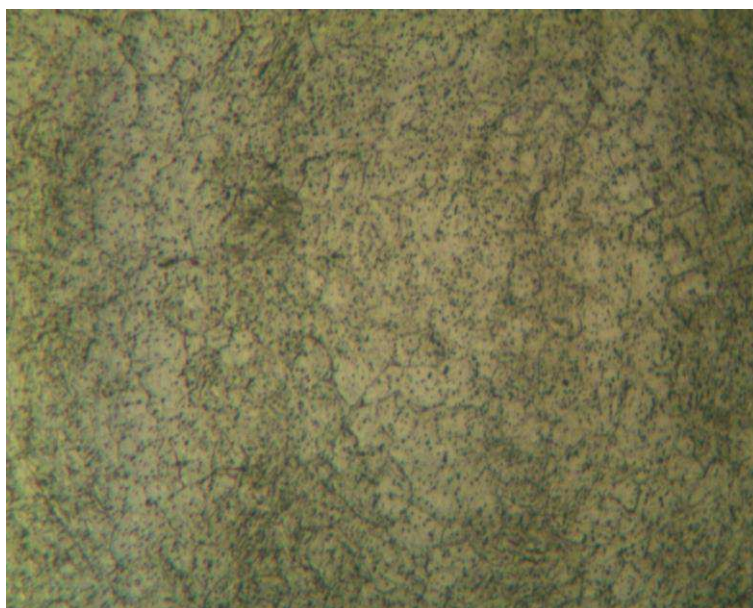


**Figura 39 - Imagem da estrutura do material em uma distância de 5/16" da base. Aumento de 800x. Ataque Nital 3%  
Fonte – Autoria Própria**





**Figura 40 - Imagem da estrutura do material em uma distância de 7/16" da base. Aumento de 800x. Ataque Nital 3%  
Fonte –Autoria Própria**

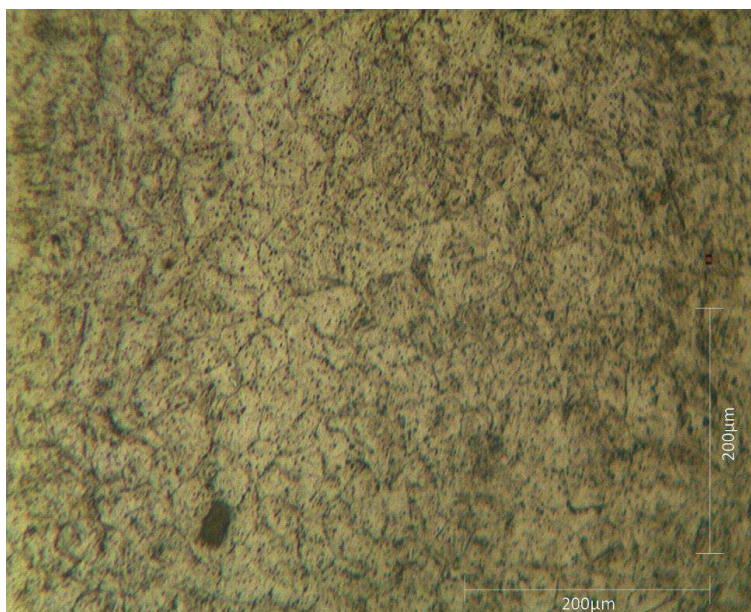


**Figura 41 - Imagem da estrutura do material em uma distância de 9/16" da base. Aumento de 800x. Ataque Nital 3%  
Fonte – Autoria Própria**

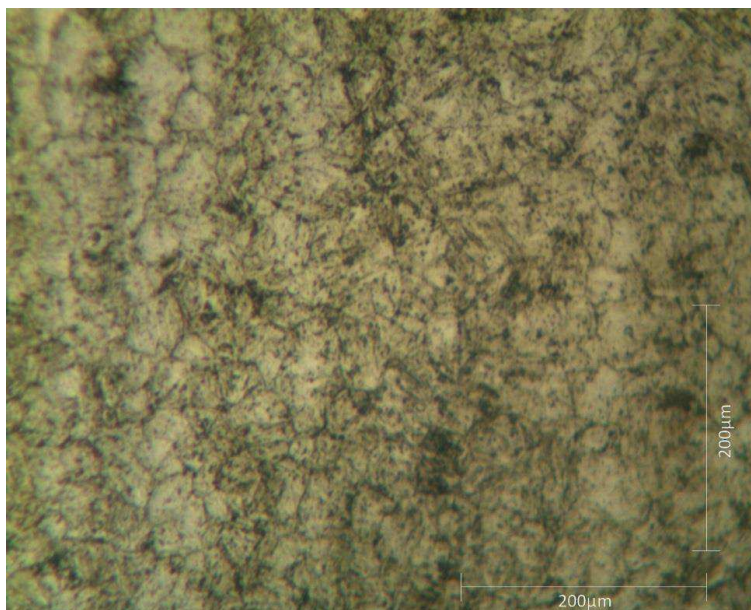
Com base nestas imagens, pode-se notar a presença de carbonetos finamente dispersos em toda a matriz martensítica de forma homogênea. Além disso, estes carbonetos também se precipitaram nos contornos de grão em moderada quantidade.

Em relação a distância da base, não é apresentado uma diferença significativa entre elas, como era o esperado de acordo com as durezas obtidas.

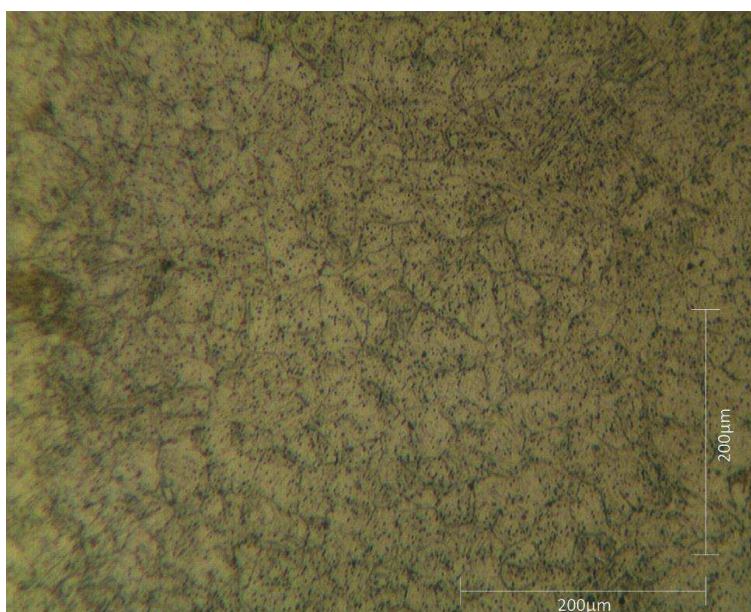
As imagens das estruturas obtidas em distancias de 13/16", 15/16", 1 1/16", 1 3/16" e 1 5/16" estão apresentadas nas figuras 42, 43, 44, 45 e 46, respectivamente. Estas imagens foram obtidas em uma parte cortada diferente das imagens anteriores, e também apresentam uma ampliação de 800x.



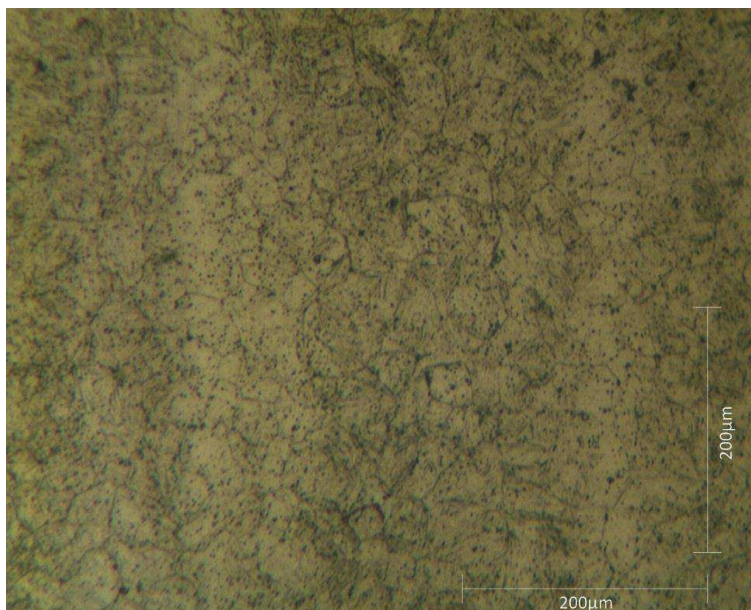
**Figura 42 - Imagem da estrutura do material em uma distância de 13/16" da base. Aumento de 800x. Ataque Nital 3%  
Fonte – Autoria Própria**



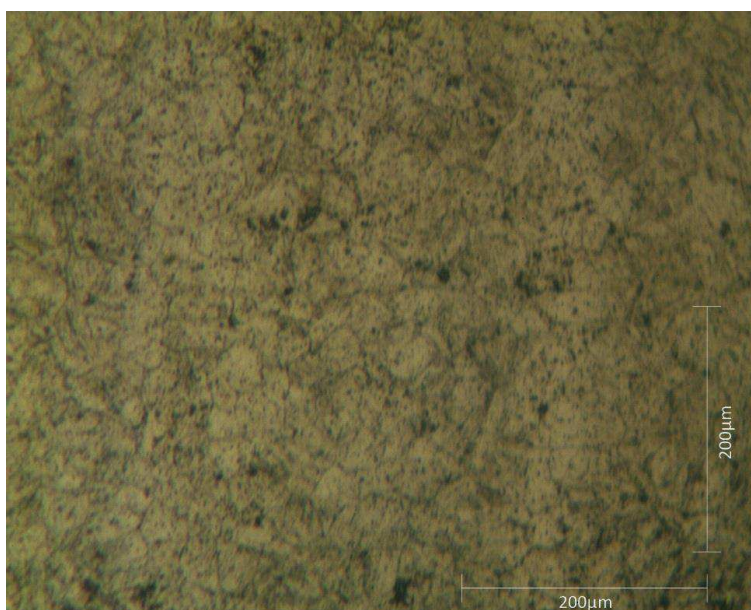
**Figura 43 - Imagem da estrutura do material em uma distância de 15/16" da base. Aumento de 800x. Ataque Nital 3%  
Fonte – Aatoria Própria**



**Figura 44 - Imagem da estrutura do material em uma distância de 1 1/16" da base. Aumento de 800x. Ataque Nital 3%  
Fonte – Aatoria Própria**

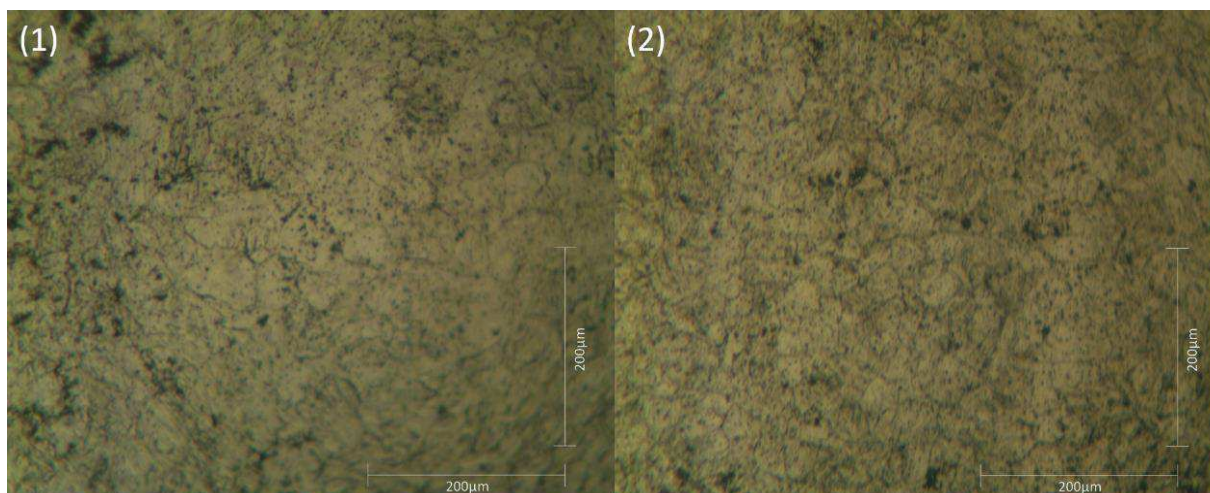


**Figura 45 - Imagem da estrutura do material em uma distância de 1 3/16" da base. Aumento de 800x. Ataque Nital 3%  
Fonte – Aatoria Própria**



**Figura 46 - Imagem da estrutura do material em uma distância de 1 5/16" da base. Aumento de 800x. Ataque Nital 3%  
Fonte – Aatoria Própria**

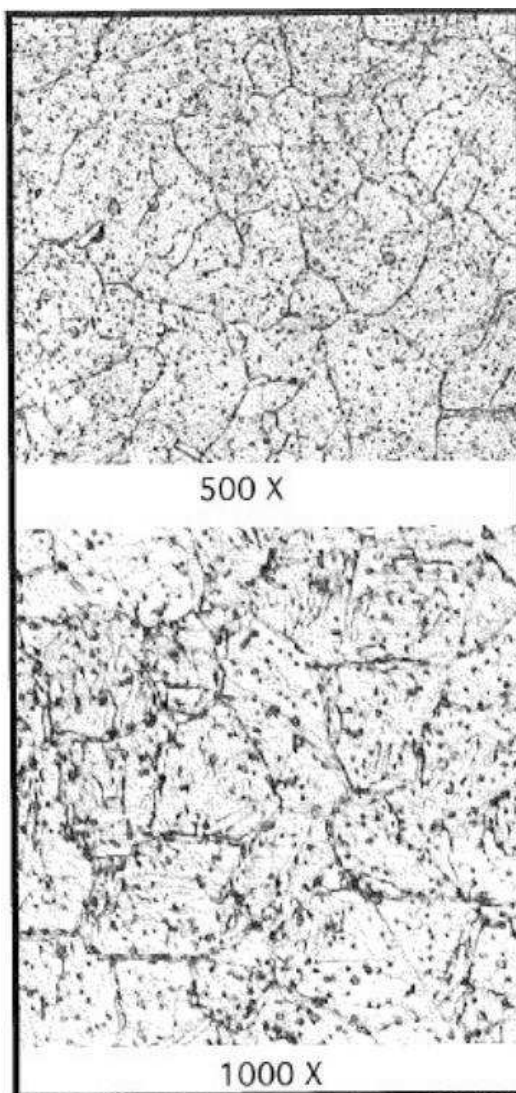
Para facilitar a comparação, as imagens obtidas em distancias de 1/16" e 1 5/16" da base tratada estão demonstradas na Figura 47. Pode-se notar que não ocorre nenhuma diferença visível entre as estruturas, sendo que ambas apresentam aproximadamente a mesma quantidade de carbonetos.



**Figura 47 – Microestrutura obtida das amostras. (1): Em uma distância de 1/16” da base, e (2): em uma distância de 1 5/16” da base. Ampliação de 800x. Ataque Nital 3%.**

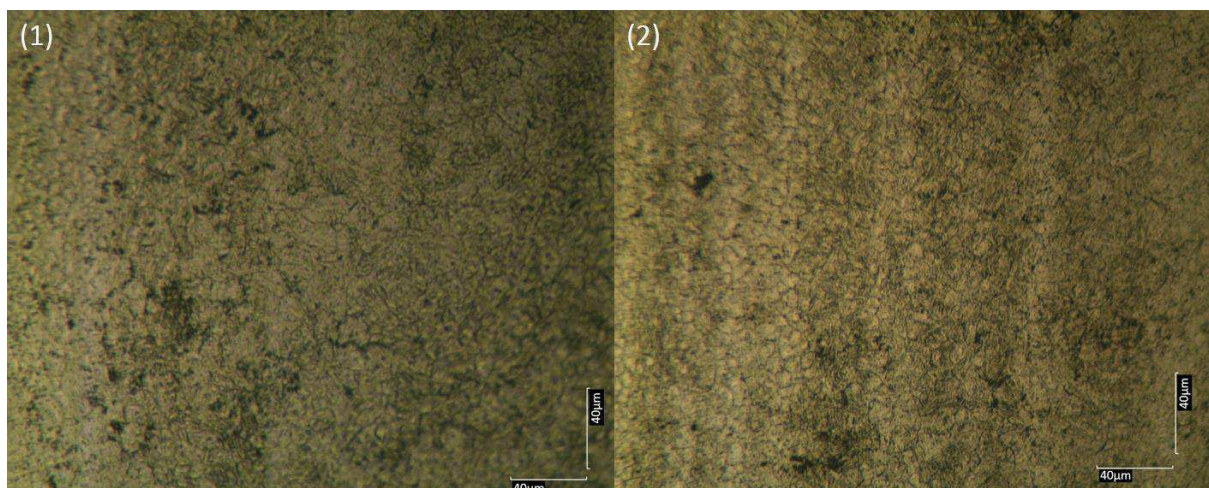
**Fonte – Autoria própria.**

Além desta comparação, pode-se comparar a microestrutura obtida com a encontrada em referências bibliográficas. A Figura 48 mostra a microestrutura do aço H13 após a têmpera, sem revenimento, em ampliações de 500x e 1000x. Pode-se notar que o tamanho de grão é próximo ao encontrado no ensaio realizado, além das concentrações de carbonetos. A cor diferente é somente uma edição de cor para se deixar em escalas de preto, e deve ser desconsiderada nesta comparação.



**Figura 48 - Metalografia do aço H13 após têmpera encontrado na bibliografia.  
Fonte - (J. C. BENEDYK, 2008)**

Para se determinar a média dos tamanhos de grãos obtidos, foi utilizado a técnica dos interceptos, com a ajuda do programa ImageJ. Com o intuito de diminuir os possíveis erros de contagem dos interceptos, foi utilizado as imagens com ampliação de 400x, nas distâncias da base de 1/16" e 1 5/16". Esta ampliação se mostrou mais eficaz na contagem pois revela nitidamente os grãos para a contagem e apresenta também uma maior quantidade de grãos na imagem. A Figura 49 revela as imagens utilizadas na determinação do tamanho médio do grão.



**Figura 49 - Microestrutura obtida em diferentes partes da amostra 23. (1): Com distância de 1/16", e (2): Com distância de 1 5/16". Ampliação de 400x. Ataque nital 3%.  
Fonte Autoria própria.**

Com estas imagens, foi obtido um tamanho de grão de  $9,47 \mu\text{m}$  para a distância da base de  $1/16''$ , com desvio padrão de 1,02 e, na distância de  $1 5/16''$ , um tamanho de grão de  $9,58 \mu\text{m}$ , com desvio padrão de 0,90. Com estes resultados, pode-se dizer que não ocorreu uma diferença significativa entre os tamanhos de grãos nas distâncias estudadas, por serem medidas equivalentes.

Para se ter uma visão mais ampla do resultado, a Figura 50 relaciona a dureza média encontrada no ensaio Jominy com algumas das estruturas encontradas em determinados pontos.





## 5 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que o procedimento se mostrou reprodutivo, na qual todas as amostras apresentaram resultados semelhantes, obtendo assim um resultado confiável. Sendo assim, pode-se obter as seguintes conclusões parciais:

1. As durezas obtidas em HRC do material após a normalização, por mais que se mostraram uniforme, não pode ser utilizado, por estar abaixo da dureza mínima recomendada pela escala de 20 HRC. Em outras palavras, a dureza obtida foi resultado da limitação da escala.
2. A dureza em HRB das amostras após a normalização obtiveram resultados constantes em toda a sua extensão, com uma dureza de aproximadamente 60 HRB;
3. Não ocorreu nenhuma diferença ao se submeter a amostra em uma atmosfera que evite a descarbonetação durante a normalização na temperatura utilizada;
4. As durezas das amostras que foram submetidas ao ensaio Jominy não ocorreram uma variação significativa de dureza conforme se distancia da base. A queda de 1HRC obtida pode ter sido causada pelo baixo número de amostras, o que se conclui que este material possui uma temperabilidade maior que o propósito do ensaio Jominy de determinar a profundidade de dureza do material;
5. As imagens obtidas na metalografia não apresentaram uma diferença relevante entre as distâncias da base resfriada observadas, que foram de 1/16" até 1 5/16".

Para se obter um resultado mais apreciável, por mais que o resultado obtido já seja satisfatório, é necessário realizar este experimento com uma maior quantidade de amostras, com o objetivo de se reduzir os erros e se obter um resultado mais apalpável.

## 6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

1 – Realizar o mesmo experimento, porém com outros métodos de resfriamento, tais como óleo e até mesmo ar, utilizando uma bomba e um jato de ar comprimido, respectivamente;

2 – Realizar o ensaio Jominy em amostras maiores, revelando assim o início da queda de dureza da curva de endurecibilidade do aço H13;

3 – Realizar ensaios mecânicos, tais como o de impacto (charpy) e o de tração nas amostras obtidas por meios de resfriamento diferentes, tais como sais fundidos, óleo e água;

4 – Realizar o mesmo trabalho e/ou as sugestões anteriores, porém realizando posteriormente o revenimento, chegando assim em um resultado de dureza e microestrutura que é utilizado na indústria em geral.

## REFERÊNCIAS

ASHBY, M.; SHERCLIFF, H.; CEBON, D. **Materiais - Engenharia, Ciência, Processamento e Projeto - Tradução da 2ª Edição**. 2. ed. [s.l.] ELSEVIER BRASIL, 2012.

ASTM INTERNATIONAL. Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel 1. . 2016, p. 26.

AZOM. **AZO Materials**. Disponível em: <<http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9107>>. Acesso em: 3 out. 2016.

BOHLER UDDEHOLM. **Bohler-Uddeholm H13 tool steel**. Elgin: [s.n.].

CALLISTER, JR, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 7. ed. Utah: LTC, 2008.

CALLISTER, JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Fundamentos da Ciência d Engenharia de Materiais: Uma abordagem integrada**. 4. ed. [s.l.] LTC, 2014.

CARDARELLI, F. Materials Handbook: A Concise Desktop Reference. In: **Materials Handbook: A Concise Desktop Reference**. 2. ed. London: Springer, 2008. p. 96–97.

CARDOSO, M. L. **Relatório de metalografia**. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAqzsAK/relatorio-metalografia>>. Acesso em: 28 maio. 2017.

**Células de sangle sob o microscópio**. Disponível em: <<http://virtualmarketingpro.com/blog/laborana/category/microscopia/>>. Acesso em: 28 maio. 2017.

**CES Edupack**. , 2013.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**, 2012.

**Curvas TTT - The Knife Network Forums : Knife Making Discussions**. Disponível em: <<http://www.knifetwork.com/forum/archive/index.php/t-54757.html>>.

**Estrutura Cristalina**. Disponível em: <<http://corro4v072.blogspot.com.br/2008/03/estrutura-cristalina.html>>.

FREITAS, P. S. Tratamento térmico dos metais: da teoria a prática. In: São Paulo: Senai-SP, 2014. p. 17.

GRACIOSO, J. F. F. **Efeito Das Condições De Têmpera Na Microestrutura e Propriedades Mecânicas De um Aço Inoxidável Martensítico CA6NM**. [s.l: s.n.].

J. C. BENEDYK. Ferrous - FeUH H-13. p. 135, 2008.

LAI, G. Y. et al. The effect of austenitizing temperature on the microstructure and

mechanical properties of as-quenched 4340 steel. **Metallurgical Transactions**, v. 5, p. 1663–1670, 1974.

MILLER, J. **BladeSmithsForum**. Disponível em: <<https://www.bladesmithsforum.com/index.php?/topic/9049-cctttt-diagram-for-5160/>>. Acesso em: 1 jun. 2017.

PENHA, R. N.; VENDRAMIM, J. C.; CANALE, L. C. F. **TENSÕES RESIDUAIS TÉRMICAS OBTIDAS DA TÊMPERA A VÁCUO DO AÇO FERRAMENTA AISI H13**. Oporto: 2011

PIMENTA, C. D. et al. Planejamento de experimentos (DOE) aplicado no processo de têmpera e revenimento de aramos de aço SAE 9154. **Janus**, v. 4, n. 5, p. 145–164, 2007.

PRAT, S.; COSTA, H. L.; RASLAN, A. A. **DESGASTE DE FERRAMENTAS DE AÇO ABNT 1045 USADAS NA USINAGEM POR ABRASÃO ULTRASSONORA**. XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica. **Anais...**São Paulo: 1999

SCHMOLZ; BICKENBACH. **Thermodur 2344 EFS (AISI H13)**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <[http://www.schmolz-bickenbach.com.br/fileadmin/files/schmolz-bickenbach.com.br/documents/FICHAS\\_TECNICAS/Thermodur\\_2344.pdf](http://www.schmolz-bickenbach.com.br/fileadmin/files/schmolz-bickenbach.com.br/documents/FICHAS_TECNICAS/Thermodur_2344.pdf)>.

SPEICH, G. R.; LESLIE, W. C. Tempering of Steel. In: [s.l.: s.n.]. v. 3p. 1043–1054.

TECLAGO. **Cortadora metalográfica**. Disponível em: <<http://www.teclago.com.br/produtos/cortadoras-metalograficas/cortadora-metalografica-cm40-teclago/>>. Acesso em: 28 maio. 2017a.

TECLAGO. **Molde de silicone de 40mm de diametro para embutimento a frio**. Disponível em: <<http://www.teclago.com.br/produtos/consumiveis-para-embutimento/molde-de-silicone-de-40mm-para-embutimento-a-frio/>>. Acesso em: 28 maio. 2017b.

**Tecnohard**. Disponível em: <<http://www.tecnohard.ind.br/downloads.php>>. Acesso em: 31 maio. 2017.

TOTTEN, G. E.; BATES, C. E.; CLINTON, N. A. **Handbook of Quenchants and Quenching Technology**. 3. ed. Ohio: ASM International, 1993.

VAN DER VOORT, G. F. Etching isothermally treated steels. **Heat Treating Progress**, v. 1, n. 2, p. 25–32, 2001.

VILLARES METALS. **Vh13IsoAços para trabalho a quente**. [s.l.: s.n.].

VILLARES METALS. **Guia de bolso**. Sumaré: RABBIT, 2011.

XAVIER, CARLOS ROBERTO, ET AL. Projeto e Construção do Aparato Jominy: Uma Contribuição para a Pesquisa no UniFOA. **Cadernos UniFOA**, v. 17, p. 89–94, 2011.