



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E SUDESTE DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E ENGENHARIAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**JOSÉ SALOMÃO AMOURY NETO**

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E LEVANTAMENTO DA CURVA JOMINY DO  
AÇO SAE 1644 PRODUZIDO EM UMA SIDERÚRGICA LOCAL**

**MARABÁ  
2014**

JOSÉ SALOMÃO AMOURY NETO

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E LEVANTAMENTO DA CURVA JOMINY DO  
AÇO SAE 1644 PRODUZIDO EM UMA SIDERÚRGICA LOCAL**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Faculdade de Engenharia  
de Materiais da Universidade Federal do  
Sul e Sudeste do Pará em cumprimento as  
exigências para obtenção do grau de  
Bacharel em Engenharia de Materiais.  
Orientador: Prof. Esp. Márcio Paulo de  
Araújo Mafra

MARABÁ  
2014

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**

**Biblioteca II da UNIFESSPA. CAMAR, Marabá, PA**

---

Amoury Neto, José Salomão

Caracterização mecânica e Levantamento da curva Jominy do aço SAE 1644 produzido em uma siderúrgica local / José Salomão Amoury Neto; 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 - Metalurgia. 2. Aço – Análise. 3. Aço – Testes. I. Mafra, Márcio Paulo de Araújo, orient. II. Título.

CDD: 22. ed.: 669.16

---

JOSÉ SALOMÃO AMOURY NETO

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E LEVANTAMENTO DA CURVA JOMINY DO  
AÇO SAE 1644 PRODUZIDO EM UMA SIDERÚRGICA LOCAL**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Faculdade de Engenharia  
de Materiais da Universidade Federal do  
Sul e Sudeste do Pará em cumprimento as  
exigências para obtenção do grau de  
Bacharel em Engenharia de Materiais.

**DATA DA AVALIAÇÃO:** \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

**CONCEITO:** \_\_\_\_\_.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Esp. Márcio Paulo de Araújo Mafra  
(UNIFESSPA – IGE – FEMAT - Orientador)

---

Prof. Dr. Silvio Alex Pereira da Mota  
(UNIFESSPA – IGE – FEMAT - Membro)

---

Prof. Dr. DENILSON DA SILVA COSTA  
(UNIFESSPA – IGE – FEMMA - Membro)

*Dedico este trabalho à minha mãe Irismar Monteiro Cavalcante e à minha namorada Edileide Alves Dos Santos por todo seu carinho, cuidado e amor.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pelo dom da vida, pelas bênçãos, e por sua graça a mim sempre concedidas. Aos meus pais, Elias Amoury e Irismar Monteiro Cavalcante, pela vida, educação, dedicação e por terem me ensinado o caminho correto a trilhar.

À minha irmã Alice Silau Amoury Neta, pelas brincadeiras, e pelo grande companheirismo que sempre demonstrou quando precisei.

À minha namorada Edileide Alves dos Santos, por sempre estar ao meu lado nos bons e maus momentos, pelo companheirismo e pelo grande apoio durante o período de minha graduação.

Aos meus familiares, que direta ou indiretamente me apoiaram nessa longa caminhada.

Aos professores da Faculdade de Engenharia de Materiais que contribuíram para minha formação profissional.

Ao meu orientador e professor, Márcio Paulo de Araújo Mafra pela amizade, orientação, paciência, pela disponibilidade e compartilhamento de conhecimento ao longo desses 5 anos.

À SINOBRAS, especialmente nas pessoas, Leidiane da Silva Rodrigues pela amizade, disponibilidade e apoio a mim prestados, Hamih de Paula Sá pela amizade e todo apoio com as análises metalográficas apresentadas neste trabalho, Wemerson Souto pela amizade de longa data e pela força com o ensaio de tração realizado neste trabalho e a todos os colaboradores que participaram de meu crescimento profissional durante o período de estágio.

Ao grande apoio dos meus amigos Raylison Bruno Pires Gonçalves, Jailes de Santana Moura e Charles Morais de Oliveira, durante todo o curso.

Às minhas amigas Karllen Camila C. de Cristo e Fernanda Borba Simões pela disposição, amizade e pelo apoio ao longo desses 5 anos.

Aos meus amigos da turma FEMAT 2010, pela parceria e convívio durante os cinco anos de curso.

E a todos que de uma maneira direta ou indireta contribuíram para minha formação e meu crescimento profissional, muito obrigado.

*Confie em Deus. Ele é mais fiel que as tuas possibilidades.  
Alice Silau Amoury Neta*

*Ainda que eu fale as línguas dos homens e dos anjos, se não tiver amor, serei como  
o bronze que soa ou como o címbalo que retine.*

*Ainda que eu tenha o dom de profetizar e conheça todos os mistérios e toda a  
ciência; ainda que eu tenha tamanha fé, a ponto de transportar montes, se não tiver  
amor, nada serei.*

*1 Coríntios 13: 1-2*

## RESUMO

Desde o início da produção dos aços, uma variada quantidade de aços foi desenvolvida. Para cada tipo de aço temos características, aplicações, propriedades e composições químicas distintas. Desta forma uma alternativa mais viável para o estudo desta grande variedade de aços seria uma análise de suas propriedades, sejam elas físicas, químicas e mecânicas, desta forma é de grande importância uma caracterização mecânica rica em todos aspectos de estudo da engenharia, conciliando os interesses da engenharia com interesses do mercado consumidor. Por outro lado a temperabilidade dos aços possui extremo valor como orientação de resistência e dureza dos aços, analisando a capacidade de endurecimento do aço, verificada através da profundidade e distribuição da dureza, obtida por tratamento térmico de têmpera. Este trabalho tem como foco a caracterização mecânica acompanhada do levantamento da capacidade de temperabilidade do aço SAE 1644, objetivando a obtenção das suas propriedades características, por meio de ensaio de dureza, ensaio de impacto, ensaio de dobramento, ensaio de tração, além de análises microestruturais e químicas seguidas de um levantamento da curva de temperabilidade pelo método Jominy. Os resultados obtidos revelam várias propriedades do aço, como a característica de fratura frágil por clivagem e a presença de precipitados de vanádio distribuídos de forma irregular em toda sua microestrutura, também temos a visualização da alta capacidade de temperabilidade do aço visto seu grande ganho de dureza na seção transversal de 22,25 HRC para aproximadamente 58,56 HRC. As propriedades mecânicas foram satisfatórias com limite de resistência de 555,30 MPa visto que o aço não passou por nenhum tipo de refino. A curva Jominy revela que o aço possui uma grande temperabilidade, comprovando a grande importância de estudos nesta área abordada.

Palavras chave: aço - metalurgia, caracterização mecânica, curva de temperabilidade, dureza.



## ABSTRACT

Since the beginning of the production of steel, a varied amount of steels has been developed. For each type of steel have characteristics, applications, different chemical compositions and properties. Thus a more viable alternative to the study of this wide variety of steel would be an analysis of their properties, whether physical, chemical and mechanical in this way is of great importance a rich mechanical characterization in all aspects of engineering study, balancing the interests engineering with the consumer market interests. On the other hand the hardenability of steels has extreme value as resistance and hardness of steels orientation, analyzing the steel hardenability, verified by the depth and distribution of hardness achieved by heat treating tempering. This work focuses on accompanied mechanical characterization of lifting the steel hardenability capacity SAE 1644, aiming to obtain characteristic properties through hardness test, impact test, bending test, tensile testing, and analysis microstructural and chemical followed by a survey of hardenability curve by Jominy method. The results show various properties of steel, as the characteristic of brittle fracture by cleavage and the presence of vanadium precipitates distributed unevenly throughout its microstructure, we also have the visualization of high hardenability steel capacity seen his big win hardness the cross section of 22.25 to about 58.56 HRC HRC. The mechanical properties were satisfactory with 555.30 MPa tensile strength as the steel has not undergone any refining. The Jominy curve reveals that the steel has a large hardenability, proving the great importance of research in this area addressed.

Keywords: steel - metallurgy, mechanical characterization, hardenability curve hardness.

## LISTAS DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Diagrama de fases do Fe-C. O lado esquerdo desse diagrama é quase idêntico ao lado esquerdo do diagrama do Fe-Fe <sub>3</sub> C, porém, nesse caso, o composto intermediário Fe <sub>3</sub> C não existe. ....	24
<b>Figura 2</b> - Transformações alotrópicas e características geométricas do ferro puro.	27
<b>Figura 3</b> - O diagrama de fases ferro – carbeto de ferro (Fe – Fe <sub>3</sub> C).....	28
<b>Figura 4</b> - Ação relativa na dureza do aço de alguns elementos de liga que se dissolvem na ferrita. ....	29
<b>Figura 5</b> - Efeito da temperatura de reaquecimento na solubilidade do vanádio e do nióbio.....	31
<b>Figura 6</b> - Efeito do fósforo na ductilidade do aço. ....	34
<b>Figura 7</b> - Influência da relação Mn/S na ductilidade do aço. ....	35
<b>Figura 8</b> - Evolução dos principais tipos de microscopia. ....	37
<b>Figura 9</b> - Representação esquemática de um espectrômetro de emissão óptica (Spark – AES). ....	41
<b>Figura 10</b> - Etapas do processo de ensaio de dureza. ....	44
<b>Figura 11</b> - Técnicas de ensaio de dureza ....	45
<b>Figura 12</b> - Sequência na medição da dureza Rockwell.....	46
<b>Figura 13</b> - (a) e (b) dobramento livre esquemático, (c), (d), (e) e (f) dobramento semiguiado esquemático.....	49
<b>Figura 14</b> - Máquina de dobramento elétrica com amostras de vergalhões para o dobramento de 180°. ....	50
<b>Figura 15</b> - (a) Corpo de prova utilizado em ensaios de impacto Charpy e Izod. (b) Um desenho esquemático de um equipamento para ensaios de impacto. O martelo é liberado de uma altura fixa h e atinge o corpo de prova; a energia gasta na fratura é refletida pela diferença entre h e a altura do balanço h'. Também estão mostrados os posicionamentos dos corpos de prova para os ensaios Charpy e Izod.....	51
<b>Figura 16</b> - Corpos de prova Charpy e Izod, recomendados pela ASTM e ABNT para ensaio de impacto e local de impacto no martelo.....	53
<b>Figura 17</b> - Um corpo de prova padrão para ensaio de tração com seção reta circular. ....	54
<b>Figura 18</b> - Representação esquemática do dispositivo usado para conduzir ensaios tensão deformação por tração. O corpo de prova é alongado pelo travessão móvel; uma célula de carga e um extensômetro medem, respectivamente, a magnitude da carga aplicada no alongamento. ....	54
<b>Figura 19</b> - Esboço da curva obtida no ensaio de tração (curva tensão-deformação convencional). ....	55
<b>Figura 20</b> - Representação gráfica de um ensaio Grossmann para um aço ABNT/SAE 1090. ....	57
<b>Figura 21</b> - Dispositivo Jominy para determinação da temperabilidade dos aços. ...	58
<b>Figura 22</b> - Ensaio Jominy de temperabilidade.....	59

<b>Figura 23</b> - Resultados da curva Jominy obtidos em diferentes laboratórios para o aço ABNT/SAE 4140. A composição nominal e o tamanho de grão para cada ensaio são semelhantes. ....	60
<b>Figura 24</b> - Máquina de serra fita utilizada. ....	61
<b>Figura 25</b> - Tarugo sendo cortado em pedaços menores para usinagem dos corpos de provas.....	62
<b>Figura 26</b> - Espectrômetro de Emissão Ótica utilizado na análise química. ....	63
<b>Figura 27</b> - Espectrômetro de Emissão Ótica utilizado na análise química. ....	63
<b>Figura 28</b> - Cortadora de amostras metalográficas utilizada. ....	64
<b>Figura 29</b> - Lixadeira e politriz utilizada na preparação das amostras.....	64
<b>Figura 30</b> - Microscópio ótico utilizado na análise microscópica. ....	65
<b>Figura 31</b> - Microscópio estéreo e unidade de fonte de luz utilizados na análise macroscópica. ....	65
<b>Figura 32</b> - Durômetro de bancada utilizado para medida de dureza Rockwell C. ...	66
<b>Figura 33</b> - Máquina de ensaio de impacto utilizada. ....	67
<b>Figura 34</b> - Máquina de ensaio de dobramento utilizada.....	67
<b>Figura 35</b> - Máquina universal de ensaio de tração utilizada.....	68
<b>Figura 36</b> - Forno mufla utilizado para realização do ensaio Jominy.....	69
<b>Figura 37</b> - Termopar utilizado para controle de temperatura do forno .....	69
<b>Figura 38</b> - Termômetro digital infravermelho usado de apoio no controle da temperatura do forno.....	70
<b>Figura 39</b> - Dispositivo Jominy utilizado para realização do ensaio.....	70
<b>Figura 40</b> - Fluxograma da metodologia utilizada para realização do trabalho.....	71
<b>Figura 41</b> - Dimensões do corpo de prova Charpy tipo A e esquema do corpo de prova. ....	72
<b>Figura 42</b> - Corpos de prova de Charpy tipo A, usinados.....	72
<b>Figura 43</b> - Esquema das dimensões do corpo de prova de dobramento. ....	73
<b>Figura 44</b> - Corpo de prova de dobramento, usinado. ....	73
<b>Figura 45</b> - Esquema do corpo de prova para ensaio de tração.....	74
<b>Figura 46</b> - Corpo de prova de tração usinado .....	74
<b>Figura 47</b> - Desenho do corpo de prova a ser utilizado no ensaio de Jominy. ....	75
<b>Figura 48</b> - Corpos de prova Jominy utilizados.....	75
<b>Figura 49</b> - Fluxograma do ensaio Jominy realizado. ....	77
<b>Figura 50</b> - CP's no forno mufla e CP's sendo ensaiados. ....	77
<b>Figura 51</b> - Representação esquemática do método de lixamento com trabalho em sentidos alternados. ....	78
<b>Figura 52</b> - Esquema de indentações utilizadas. ....	79
<b>Figura 53</b> - Amostra logo após realização do ensaio de dureza.....	80
<b>Figura 54</b> - Fratura observada nos CP's após ensaio de impacto de Charpy. ....	84
<b>Figura 55</b> - Fratura observada através do microscópio estéreo. ....	84
<b>Figura 56</b> - Corpo de prova de dobramento após ensaio. ....	85
<b>Figura 57</b> - Fratura do CP de dobramento observada por microscópio estéreo. ....	86
<b>Figura 58</b> - Gráficos tensão-deformação dos CPs ensaiados. ....	87
<b>Figura 59</b> - Fratura do CP de tração observada no microscópio estéreo. ....	90

<b>Figura 60</b> - Microestrutura observada, após ataque de picral 4%, com aumento de 50x. ....	90
<b>Figura 61</b> - Microestrutura observada, após ataque de picral 4%, com aumento de 100x. ....	91
<b>Figura 62</b> - Microestrutura observada, após ataque de picral 4%, com aumento de 200x. ....	91
<b>Figura 63</b> - Microestrutura observada, após ataque de picral 4%, com aumento de 500x. ....	92
<b>Figura 64</b> - Microestrutura observada, após ataque de picral 4%, com aumento de 1000x. ....	92
<b>Figura 65</b> - Curva Jominy do aço SAE 1644.....	94
<b>Figura 66</b> - Gráfico da comparação Dureza na região transversal x Dureza na extremidade temperada na região transversal. ....	96
<b>Figura 67</b> - Microestrutura da extremidade temperada, após ataque de picral 4%, com aumento de 100x.....	97
<b>Figura 68</b> - Microestrutura da extremidade temperada, após ataque de picral 4%, com aumento de 200x.....	98
<b>Figura 69</b> - Microestrutura da extremidade temperada, após ataque de picral 4%, com aumento de 500x.....	98
<b>Figura 70</b> - Microestrutura da extremidade temperada, após ataque de picral 4%, com aumento de 1000x.....	99

## LISTAS DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Nomenclatura para aços AISI e SAE.....	21
<b>Tabela 2</b> - Designação básica de alguns aços (NBR NM 87:2000, p.3). .....	22
<b>Tabela 3</b> - Composição química do aço SAE/AISI 1644.....	23
<b>Tabela 4</b> - Algumas características da microscopia.....	38
<b>Tabela 5</b> - Escalas de dureza Rockwell e dureza típicas.....	47
<b>Tabela 6</b> - Escala de dureza Rockwell superficial e aplicações típicas.....	48
<b>Tabela 7</b> - Análise química do aço SAE 1644 realizada por espectrometria de emissão ótica (THERMO).....	81
<b>Tabela 8</b> - Análise química do aço SAE 1644 realizada por espectrometria de emissão ótica (SPECTRO).....	81
<b>Tabela 9</b> - Dureza obtida nos corpos de prova. ....	82
<b>Tabela 10</b> - Energia absorvida no ensaio de impacto. ....	83
<b>Tabela 11</b> - Propriedades mecânicas do aço SAE 1644.....	89
<b>Tabela 12</b> - Especificações de propriedades mecânicas dos vergalhões definidas na norma ABNT NBR 7480. ....	89
<b>Tabela 13</b> - Resultado da dureza obtida no ensaio Jominy. ....	93
<b>Tabela 14</b> - Dureza obtida na extremidade temperada do aço SAE 1644. ....	95
<b>Tabela 15</b> - Análise química da extremidade temperada.....	97

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

UNIFESSPA	Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará
FEMAT	Faculdade de Engenharia de Materiais
SAE	Society Automotive Engineers
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
p.C.	Porcentagem de Carbono
Fe	Ferro (Elemento químico)
C	Carbono (Elemento químico)
P	Fósforo (Elemento químico)
S	Enxofre (Elemento químico)
Mn	Manganês (Elemento químico)
Si	Silício (Elemento químico)
Cr	Cromo (Elemento químico)
Mo	Molibdênio (Elemento químico)
Ni	Níquel (Elemento químico)
V	Vanádio (Elemento químico)
Cu	Cobre (Elemento químico)
Nb	Nióbio (Elemento químico)
Sn	Estanho (Elemento químico)
N	Nitrogênio (Elemento químico)
HRC	Dureza Rockwell C
mm	Milímetro
μm	Micrômetro
SINOBRAS	Siderúrgica Norte Brasil S.A.
Dc	Diâmetro Crítico
CE	Carbono Equivalente
ppm	Partes por milhão
CP	Corpo de Prova
TTT	Tempo – Temperatura – Transformação

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	16
1.1. OBJETIVOS.....	17
1.1.1. <b>Objetivo Geral</b> .....	17
1.1.2. <b>Objetivos Específicos</b> .....	17
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	18
2.1. AÇOS.....	18
2.1.1. <b>Nomenclatura dos aços</b> .....	20
2.1.2. <b>Aço SAE 1644</b> .....	22
2.2. DIAGRAMA FERRO-CARBETO DE FERRO (FE – FE <sub>3</sub> C).....	23
2.3. EFEITOS DOS ELEMENTOS DE LIGA.....	28
2.3.1. <b>Vanádio</b> .....	29
2.3.2. <b>Nióbio</b> .....	32
2.3.3. <b>Silício</b> .....	32
2.3.4. <b>Manganês</b> .....	33
2.3.5. <b>Cobre</b> .....	33
2.4. EFEITO DAS IMPUREZAS.....	33
2.4.1. <b>Fósforo</b> .....	33
2.4.2. <b>Enxofre</b> .....	34
2.4.3. <b>Estanho</b> .....	35
2.4.4. <b>Nitrogênio</b> .....	36
2.5. ANÁLISE MICROSCÓPICA.....	36
2.5.1. <b>Microscopia Óptica</b> .....	38
2.6. ANÁLISE METALOGRÁFICA .....	39
2.7. ANÁLISE DO AÇO POR ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ATÔMICA .....	40
2.8. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	41
2.9. ENSAIO DE DUREZA.....	42
2.9.1. <b>Dureza por risco</b> .....	42
2.9.2. <b>Dureza por choque</b> .....	43
2.9.3. <b>Dureza por penetração</b> .....	43
2.9.4. <b>Dureza Rockwell</b> .....	45
2.10. ENSAIO DE DOBRAMENTO.....	48
2.11. ENSAIO DE IMPACTO.....	50
2.12. ENSAIO DE TRAÇÃO .....	53
2.13. TEMPERABILIDADE DOS AÇOS .....	56

2.13.1. Ensaio Grossmann .....	56
2.13.2. Ensaio Jominy .....	57
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>61</b>
3.1. MATERIAIS .....	61
3.1.1. Análise Química .....	62
3.1.2. Análise Metalográfica .....	63
3.1.3. Ensaio de Dureza .....	66
3.1.4. Ensaio de Impacto .....	66
3.1.5. Ensaio de dobramento .....	67
3.1.6. Ensaio de tração .....	68
3.1.7. Ensaio Jominy .....	68
3.2. MÉTODOS .....	71
3.2.1. Confeção dos corpos de prova .....	71
3.2.2. Ensaio de Impacto .....	75
3.2.3. Ensaio de Dobramento .....	76
3.2.4. Ensaio de Tração .....	76
3.2.5. Ensaio Jominy .....	76
3.2.6. Análise Metalográfica .....	78
3.2.7. Ensaio de dureza .....	79
3.2.8. Análise química .....	80
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>81</b>
4.1. ANÁLISE QUÍMICA .....	81
4.2. ENSAIO DE DUREZA .....	82
4.3. ENSAIO DE IMPACTO .....	83
4.4. ENSAIO DE DOBRAMENTO .....	85
4.5. ENSAIO DE TRAÇÃO .....	86
4.6. ANÁLISE METALOGRÁFICA .....	90
4.7. ENSAIO JOMINY .....	93
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>100</b>
<b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>101</b>
<b>7. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>102</b>



## 1. INTRODUÇÃO

Ao longo da história da produção e utilização dos aços, uma enorme quantidade de aços foi desenvolvida. Todos estes aços apresentam uma ampla gama de variação de propriedades e composição química, em razão da diversidade de aplicações deste material, ou mesmo da adaptação dos processos de produção às condições de uma determinada empresa (matéria-prima, limitações de equipamentos ou escala de produção, grau de desenvolvimento tecnológico, etc.). O estudo dos aços seria uma tarefa exaustiva e improdutivo, se fosse utilizada como ponto de partida a classificação dos aços de acordo com a sua composição química. Desta forma uma alternativa mais viável é o estudo dos aços de acordo com as suas propriedades sejam elas mecânicas, físicas e químicas [1].

A intensidade de cada uma destas propriedades está relacionada com a composição química e com a estrutura do material, sendo que a estrutura depende, por sua vez da própria composição química, do processo de fabricação e das condições de utilização da peça (temperatura, tempo, meio-ambiente, tensões aplicadas, etc).

Sabe-se que as ligas ferrosas, especialmente os aços, têm uma importância fundamental na construção mecânica devido à sua versatilidade. Seu emprego é bastante diversificado e quando se trata de aplicações, sua seleção deve ser muito criteriosa. Para tanto, são necessários dados que orientem o projetista para uma perfeita adequação ao uso e a responsabilidade que o componente mecânico possuirá ao longo da sua vida útil. Desta forma a caracterização mecânica deve possuir uma coleta de dados rica em todos os aspectos de estudo da engenharia, ou seja, tanto do ponto de vista fenomenológico como do ponto de vista de custos de produção, a fim de conciliar interesses de engenharia com interesses do mercado consumidor no qual o produto será inserido [2].

Por outro lado o ensaio de temperabilidade possui extremo valor como orientação de resistência e dureza na construção mecânica. A temperabilidade é definida como a propriedade que determina a capacidade de endurecimento do aço verificada através da profundidade e distribuição da dureza, obtida por tratamento térmico de têmpera.

O seguinte trabalho tem como foco a caracterização mecânica e levantamento da capacidade de temperabilidade de um aço raramente produzido, o aço SAE 1644, visando a obtenção de suas propriedades características, por meio de ensaios de dureza, impacto, dobramento e tração, análises microestruturais e químicas e levantamento da curva de temperabilidade pelo método Jominy.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é a caracterização mecânica e levantamento da curva de temperabilidade do aço SAE 1644.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

Avaliar as propriedades mecânicas do aço SAE 1644, por meio de ensaios de dureza, ensaios de impacto (ensaio de Charpy), ensaios de dobramento, e ensaios de tração.

Levantar a curva de temperabilidade (método de Jominy) para o aço SAE 1644.

Analisar metalograficamente as amostras antes e depois da realização do ensaio Jominy, através de imagens feitas por microscópio ótico e microscópio estéreo.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. AÇOS

O aço é a liga metálica mais utilizada pelo homem, pois sua grande versatilidade e seu baixo custo possibilitam a sua utilização em uma gama de aplicações, desde minúsculas peças como engrenagens de relógios, molas de expansão das veias cardíacas, até grandes estruturas como pontes edifícios e navios [1].

Essa versatilidade dos aços como materiais de engenharia é evidenciada pelos muitos tipos de aços que são fabricados. Num extremo, os aços podem ser muito macios, próprios para estampagens profundas como as utilizadas na fabricação de para-lamas de automóveis e painéis de uso doméstico. Por outro lado, podem ser extremamente duros e resistentes, empregados na produção de engrenagens e escavadeiras. Alguns aços devem possuir uma excepcional resistência a corrosão. Aços para certas aplicações elétricas, como por exemplo, placas de transformadores, devem ter características especiais de modo a poderem ser magnetizados e desmagnetizados muitas vezes a cada segundo, com pequena perda de potência. Outros já devem ser completamente não-magnéticos, como os aplicados em relógios de pulso e detectores de minério. Os diagramas de fase podem ser usados para auxiliar no entendimento de cada uma das características citadas [3].

Existem uma gama de conceitos sobre a definição de aço. Segundo o minidicionário Aurélio, temos que o aço:

“Liga constituída principalmente de ferro e carbono, mas que pode conter outros elementos (p. ex., cromo, manganês ou molibdênio), que lhe conferem propriedades especiais, como resistência à corrosão, dureza, etc” [4].

De uma forma mais abrangente, o aço é uma liga metálica composta principalmente de ferro e de pequenas quantidades de carbono, geralmente entre 0,008% a 2,14% p. C. Os ferros fundidos também são ligas ferro-carbono, que no entanto diferem-se dos aços por terem em sua estrutura uma maior quantidade de carbono, que está compreendida entre 2,14 e 6,7% p. C. Os aços são agrupados em função de seu teor de carbono, como aços de alto, médio e baixo carbono, e ainda

temos outras designações como aços-liga, aços-ferramentas e diversos aços especiais que vêm sendo desenvolvidos para as mais diversas aplicações [5, 6].

Este teor de carbono que separa os aços de ferro fundidos tem uma pequena variação conforme a literatura abordada como podemos observar:

“O aço geralmente contém entre 0,05 e 2,0% p. C. Os ferros fundidos geralmente contêm entre 2,0 e 4,5% p. C.” [7].

O aço contém geralmente 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, o limite inferior a 0,008% corresponde à máxima solubilidade de carbono no ferro à temperatura ambiente e o limite superior 2,11% corresponde a máxima quantidade de carbono que se dissolve no ferro e que ocorre a 1148 °C [8].

Essa quantidade máxima de 2,0% ou 2,11%, depende da presença ou não dos elementos de liga ou da presença dos elementos residuais em teores acima dos que não são considerados normais. Desta forma para se ter uma definição mais precisa, consideramos dois tipos fundamentais de aço:

-aço-carbono ou “liga 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 apresenta os elementos residuais em teores acima dos que são considerados normais”.

Os primeiros são subdivididos em:

-Aços de baixo teor de carbono, com C inferior a 0,2%;

-Aços de médio carbono, com C entre 0,2 e 0,5%;

-Aços de alto teor de carbono, com C acima de 0,5%;

Os aços ligas por sua vez são divididos em 2 grupos:

-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% [8].

A produção de aço é uma atividade de grande potencial para geração de crescimento econômico e social de uma região e de um país, seja pela necessidade de mão-de-obra qualificada, pela elevada utilização de matérias-primas e insumos (minérios, refratários, gases industriais, sucatas), pela geração de várias indústrias de fornecimento de equipamentos ou componentes (máquinas, caldeiras, sensores, motores) e serviços (manutenção mecânica, elétrica, instrumentação e refratários), além de indústrias para utilização local dos produtos e co-produtos siderúrgicos (metalúrgicas para produção de tubos ou estruturas metálicas ou estampados pré-

montados, relaminações, fábricas de cimento, recuperação de escórias e lamas, termoelétricas) [1].

### **2.1.1. Nomenclatura dos aços**

A importância do carbono no aço tornou desejável indicar o seu conteúdo no esquema de identificação desse tipo de liga. Desta forma foi adotado um sistema de 4 algarismos, nos quais os dois últimos indicam os centésimos percentuais do conteúdo de carbono, mostrado na tabela 1. Podemos utilizar como exemplo o aço 1040 que tem 0,40% de carbono (mais ou menos uma pequena faixa aceitável). Os dois primeiros algarismos codificam o tipo de elemento de liga adicionado ao ferro carbono. A classificação utilizada no exemplo (10xx) é reservada aos aços ao carbono comum cujo eventual conteúdo de elementos de liga constituem o mínimo irrelevante [3].

Estas designações para os aços são aceitas como padrão tanto pelo American Iron and Steel Institute (AISI), quanto pela Society of Automotive Engineers (SAE). Muitos aços comerciais não se encontram incluídos nesse esquema de classificação devido adições bem maiores de elementos de liga. Tais aços, contudo, por possuírem aplicações tão especializadas, não costumam ser estocados como item regular de venda ao nível do fornecedor de materiais [3].

**Tabela 1** – Nomenclatura para aços AISI e SAE.

<b>Número SAE ou AISI</b>	<b>Composição</b>
10xx	Aços ao carbono comuns*
11xx	Aços ao carbono resulfurados (para boa usinabilidade)
15xx	Manganês (1,0 a 2,0%)
40xx	Molibdênio (0,20 a 0,30%)
41xx	Cromo (0,40 a 1,20), molibdênio (0,08 a 0,25%)
43xx	Níquel (1,65 a 2,00%), cromo (0,40 a 1,90%), molibdênio (0,20 a 0,30%)
44xx	Molibdênio (0,5%)
46xx	Níquel (1,40 a 2,00%), molibdênio (0,15 a 0,30%)
48xx	Níquel (3,25 a 3,75%), molibdênio (0,20 a 0,30%)
51xx	Cromo (0,70 a 1,20%)
61xx	Cromo (0,70 a 1,10%), vanádio (0,10%)
81xx	Níquel (0,20 a 0,40%), cromo (0,30 a 0,55%), molibdênio (0,08 a 0,15%)
86xx	Níquel (0,30 a 0,70%), cromo (0,40 a 0,85%), molibdênio (0,08 a 0,25%)
87xx	Níquel (0,40 a 0,70%), cromo (0,40 a 0,60%), molibdênio (0,20 a 0,30%)
92xx	Silício (1,80 a 2,20%)

xx: conteúdo de carbono 0,xx%

\* Todos os aços ao C comuns contêm 0,50% ± de Mn, e quantidades residuais (<0,05% em peso) de outros elementos.

**Fonte:** [Adaptada, 3]

A ABNT, (Associação Brasileira de Normas Técnicas), também utiliza uma nomenclatura semelhante e conta em seu acervo com algumas normas técnicas de referência para a designação dos aços. A tabela 2 foi construída a partir de dados extraídos da norma ABNT NBR NM 87:2000 afim de elucidar e demonstrar a aplicação do critério supracitado. A composição química não está incluída na tabela visto que o critério é semelhante a nomenclatura anterior e o enfoque são os elementos presentes [5].

**Tabela 2** - Designação básica de alguns aços (NBR NM 87:2000, p.3).

Designação básica de alguns aços		
Aços carbono	de baixo e médio manganês	10XX
	com adição de Nb	14XX
	de alto manganês	15XX
Aços ligados ao	níquel	23XX
	níquel-cromo	30XX
	cromo-molibdênio	41XX
	níquel-cromo-molibdênio	43XX
Aços carbono e ligados	boro	XXBXX
	chumbo	XXLXX
	enxofre	XXSXX

**Fonte:** [Adaptada, 5]

Dentre a numerosa família existente de aços, destacamos o aço SAE 1644, objeto desse estudo.

### 2.1.2. Aço SAE 1644

O aço 1644 é um aço carbono com teor de manganês de 0,9 a 1,1% e de vanádio de 0,03 a 0,04%. Sua composição é válida para o órgão classificador SAE.

Este aço quase não é utilizado, para esse estudo o mesmo foi obtido da empresa SINOBRAS – Siderúrgica Norte Brasil S.A. onde era produzido em seu “start up” sendo posteriormente substituído pelo aço SAE 1140. A tabela 3 mostra a composição química do aço SAE 1644.

**Tabela 3** – Composição química do aço SAE/AISI 1644.

Composição Química							
Elemento	%C	%Si	%Mn	%S	%P	%Cu	%Ni
mín.	0,440	0,150	0,900	0,000	0,000	0,000	0,000
máx.	0,480	0,300	1,100	0,050	0,050	0,400	0,300
Composição Química							
%Cr	%Sn	%Nb	%Mo	%V	%N	Mn/Si	Mn/S
0,000	0,000	0,000	0,000	0,030	0,000	3,00	28,00
0,300	0,150	0,010	0,100	0,040	0,015	-	-

Fonte: [Adaptada, 9]

## 2.2. DIAGRAMA FERRO-CARBETO DE FERRO (FE – FE<sub>3</sub>C)

A compreensão dos diagramas de fases para sistemas de ligas é extremamente importante, pois existe uma forte correlação entre a microestrutura e as propriedades mecânicas, e o desenvolvimento da microestrutura de uma liga está relacionado às características do seu diagrama de fases. Adicionalmente, os diagramas de fases fornecem informações valiosas sobre fusão, fundição e cristalização, entre outros fenômenos [10].

De todos os sistemas de ligas binárias, possivelmente temos como o mais importante o formado pelo ferro e o carbono. Tanto os aços quanto os ferros fundidos, que são os principais materiais estruturais em toda cultura tecnologicamente avançada, são essencialmente ligas ferro-carbono. Desta forma o diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C fornece a principal base científica para as indústrias do ferro e aço, sendo a base para o tratamento térmico da maioria dos nossos aços [6, 7, 3].

O termo fase se refere a uma porção do espaço onde a composição química e as propriedades são idênticas ao longo do seu domínio (parte homogênea do sistema), o qual é separado das outras partes do sistema por uma superfície de divisão visível, chamada interface [11].

As fases, bem como os diagramas de fases podem ser divididos em duas categorias básicas: [11]

a) Fases estáveis, resultantes de transformações de fases ocorrendo o equilíbrio termodinâmico significando que todas as reações de transformações tiveram tempo suficiente para ocorrer, tanto no aquecimento, como no resfriamento das amostras, ou seja, empregaram-se velocidades de aquecimento e resfriamento lentas o

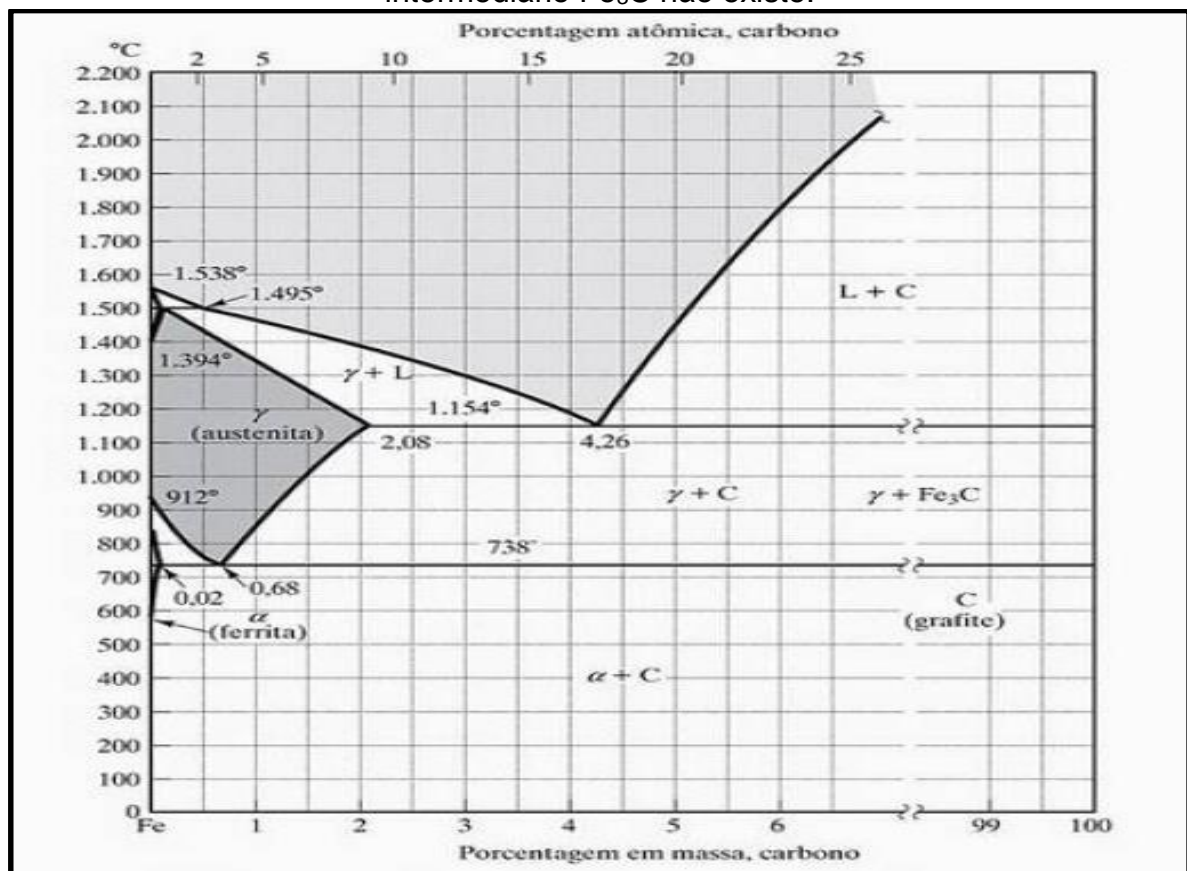


suficiente para que a movimentação dos átomos por difusão permita que o equilíbrio termodinâmico seja mantido.

b) Fases metaestáveis, resultantes da transformação fora do equilíbrio termodinâmico, como, por exemplo, os diagramas de tempo, temperatura, transformação (TTT) muito utilizados para planejamento dos tratamentos térmicos dos aços.

Desta forma ironicamente, o diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C não é um diagrama de equilíbrio verdadeiro. O sistema Fe-C representa este verdadeiro equilíbrio, o qual é mostrado na figura 1. Embora o grafite (C) seja um precipitado mais estável do que o Fe<sub>3</sub>C, a taxa de precipitação do grafite é muito mais lenta (cinética lenta) do que a do Fe<sub>3</sub>C, desta forma o resultado é que, em aços comuns (e em muitos ferros fundidos), a fase do Fe<sub>3</sub>C é metaestável; ou seja, para todas as finalidades práticas, ele é estável com o tempo e se ajusta à regra das fases de Gibbs [7].

**Figura 1** - Diagrama de fases do Fe-C. O lado esquerdo desse diagrama é quase idêntico ao lado esquerdo do diagrama do Fe-Fe<sub>3</sub>C, porém, nesse caso, o composto intermediário Fe<sub>3</sub>C não existe.



Fonte: [7]

O ferro puro tem alterada sua estrutura cristalina duas vezes antes de se fundir, passando de CCC para CFC a 912 °C (1673 °F), no aquecimento. Mais acima essa alteração é revertida a 1394 °C (2540 °F). A variedade alotrópica CCC permanece estável até a fusão do ferro a 1538 °C (2800 °F) [3].

**Ferrita, ou ferro –  $\alpha$ :** A configuração estrutural do ferro puro à temperatura ambiente é denominada, alternativamente, ferro –  $\alpha$  ou ferrita. A ferrita é uma fase dúctil apresentando dureza e resistência mecânicas baixas; com a pureza comercialmente encontrada, sua resistência à tração é menor que 310 MPa (45.000 psi). É um material ferromagnético a temperaturas inferiores a 770 °C (1418 °F) [3, 11].

Como a ferrita tem uma estrutura cúbica de corpo centrado, os interstícios são pequenos e pronunciadamente alongados, não podendo acomodar com facilidade nem mesmo um pequeno átomo esférico de carbono. Desta forma, a solubilidade de carbono na ferrita é muito baixa (< 1 átomo de carbono para 1000 átomos de ferro), assim o átomo de carbono é pequeno demais para uma solução sólida substitucional e muito grande para uma solução sólida intersticial extensa [3].

**Austenita, ou ferro –  $\gamma$ :** A configuração de face centrada do ferro é denominada austenita, ou ferro –  $\gamma$ . É a forma estável do ferro puro a temperaturas entre 912 °C e 1394 °C. É difícil comparar as propriedades mecânicas entre ferrita e austenita porque isto teria que ser efetuado para temperaturas diferentes. Contudo pode-se dizer que nas temperaturas de sua estabilidade, a austenita é macia e dúctil, sendo conseqüentemente bastante proveitosa aos processos de fabricação. Na maioria das operações de laminação e forjamento de aços é conduzida a temperaturas iguais ou superiores a 1100 °C (2000 °F), quando então o ferro é cúbico de face centrada. A austenita não é ferromagnética qualquer que seja a temperatura [3].

A estrutura cúbica de face centrada do ferro tem espaçamentos interatômicos maiores que os da ferrita. Mesmo assim, os vazios naturais da estrutura CFC são escassamente longos o suficiente para aglomerar átomos de carbono nos interstícios e este aglomerado introduz deformações na estrutura. Desta forma nem todos os vazios podem ser preenchidos num só tempo ( $\approx$  6% a 912 °C). A solubilidade do carbono é maior na austenita podendo chegar a 2,04% a 1146 °C, sendo que sua solubilidade máxima é de somente 2,11% (9% atômicos) em peso de carbono. Por definição, os aços contêm menos de 1,2% de carbono, desta forma, a altas temperaturas, os aços têm seu carbono inteiramente dissolvido na austenita [3, 11].

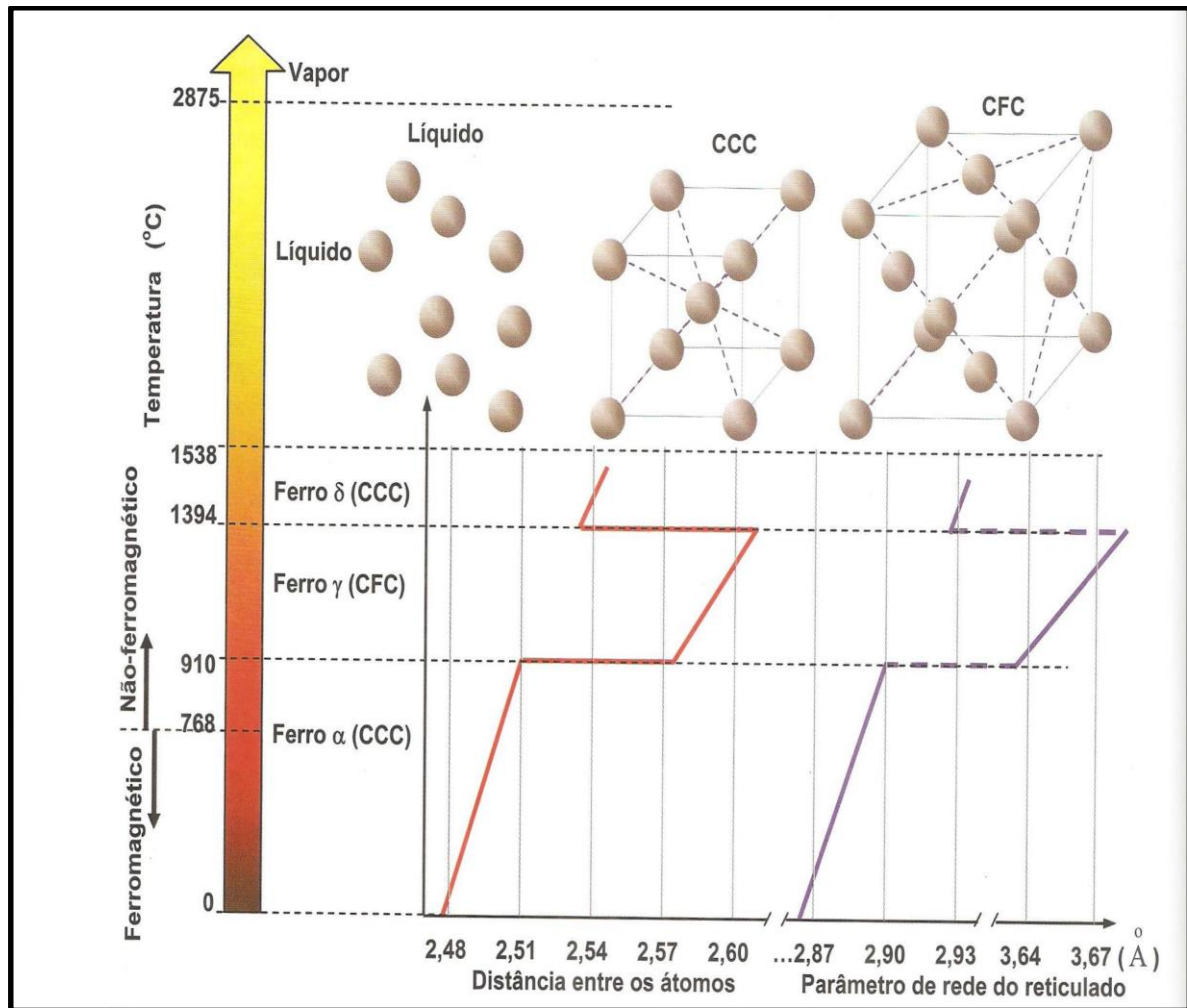
**Ferro –  $\delta$ :** Acima de 1394 °C (2540 °F), a austenita não é mais, a longo alcance, a forma estrutural mais estável do ferro, uma vez que volta a prevalecer a configuração cúbica de corpo centrado, agora denominado ferro –  $\delta$ . Ela é idêntica ao ferro –  $\alpha$ , exceto quanto a faixa de temperatura s, e pela semelhança, é normalmente chamada de ferrita –  $\delta$ . A solubilidade do carbono nessa estrutura é apreciavelmente maior que na ferrita –  $\alpha$ , como decorrência das típicas temperaturas elevadas, tendo como limite máximo de solubilidade de 0,09% a 1492 °C [3, 11].

A figura 2 mostra as transformações alotrópicas e algumas características do ferro puro.

**Carbeto de ferro (cementita):** Nas ligas ferro carbono, o carbono que excede o limite de solubilidade deve formar uma segunda fase, mais comumente o carbeto de ferro, que possui composição química do  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Isso não significa que o carbeto de ferro forme moléculas de  $\text{Fe}_3\text{C}$ , mas, simplesmente, que o reticulado cristalino contém átomos de ferro e de carbono numa proporção de 3 para 1, respectivamente. O  $\text{Fe}_3\text{C}$  tem uma célula unitária ortorrômbica com 12 átomos de ferro e 4 átomos de carbono por célula e, portanto, um conteúdo de 6,7% de carbono em peso [3, 11].

Comparativamente à austenita e à ferrita, a cementita é muito dura. A presença de carbeto de ferro na ferrita dos aços aumenta grandemente a resistência mecânica. Entretanto sendo o carbeto de ferro puro, não dúctil, não consegue se ajustar diante de concentrações de tensão; logo é relativamente frágil em si mesmo [3].

**Figura 2** – Transformações alotrópicas e características geométricas do ferro puro.



Fonte: [11]

Existem três pontos invariantes muito importantes no diagrama de fase: o peritético, o eutético e o eutetóide. A reação peritética encontra-se a uma temperatura de 1493°C e a 0,17%C, no resfriamento ocorre a seguinte transformação: [10]



Já a reação eutética a temperatura é de 1148°C e a 4,3% de C, no resfriamento ocorre a seguinte transformação:

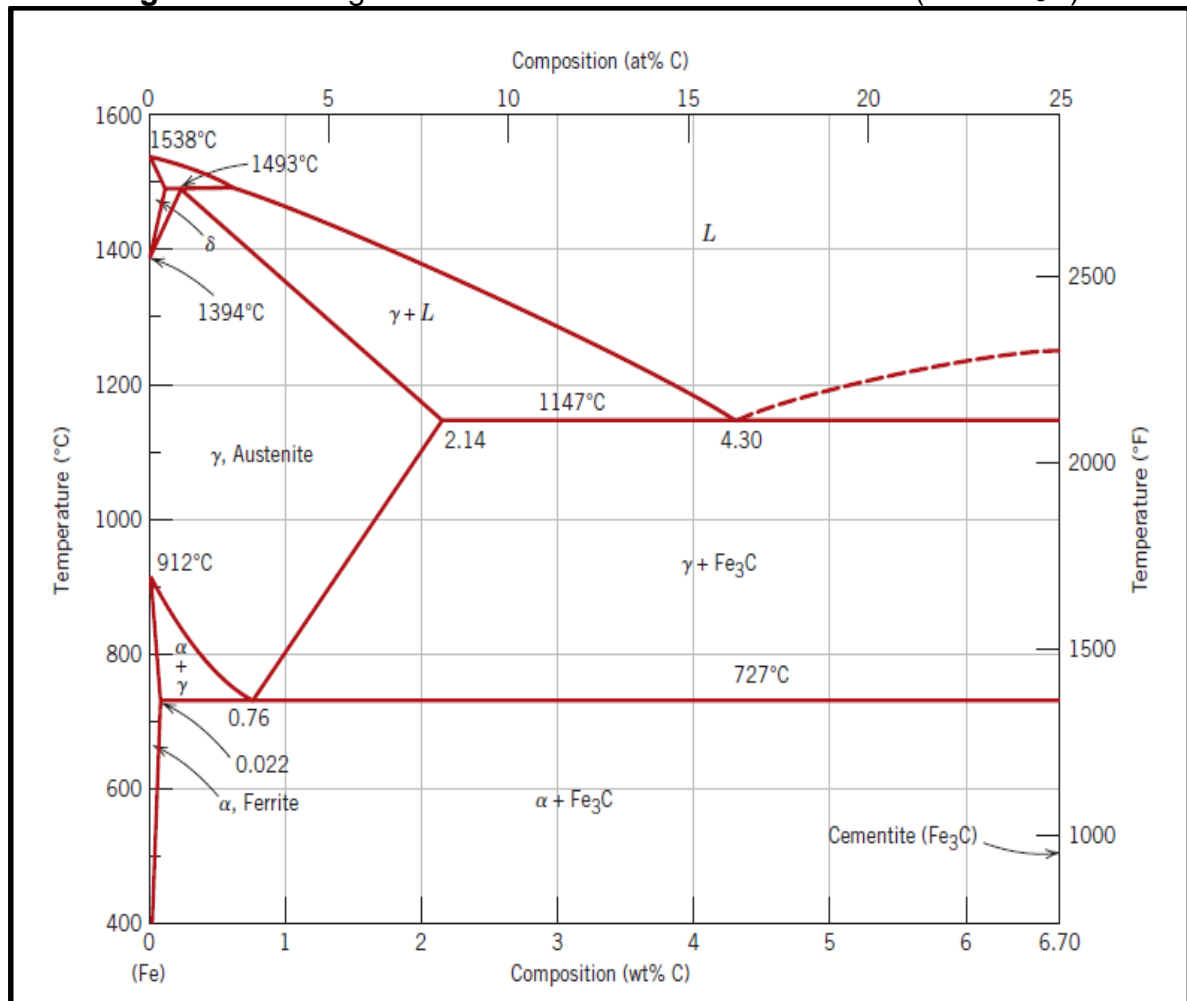


E por fim, temos a reação eutetóide a uma temperatura de 727°C e 0,77% de C, no resfriamento teremos a seguinte transformação.



Uma parte do diagrama de fases ferro-carbono está apresentada na figura 3.

**Figura 3** – O diagrama de fases ferro – carbeto de ferro ( $\text{Fe} - \text{Fe}_3\text{C}$ ).



Fonte: [12]

### 2.3. EFEITOS DOS ELEMENTOS DE LIGA

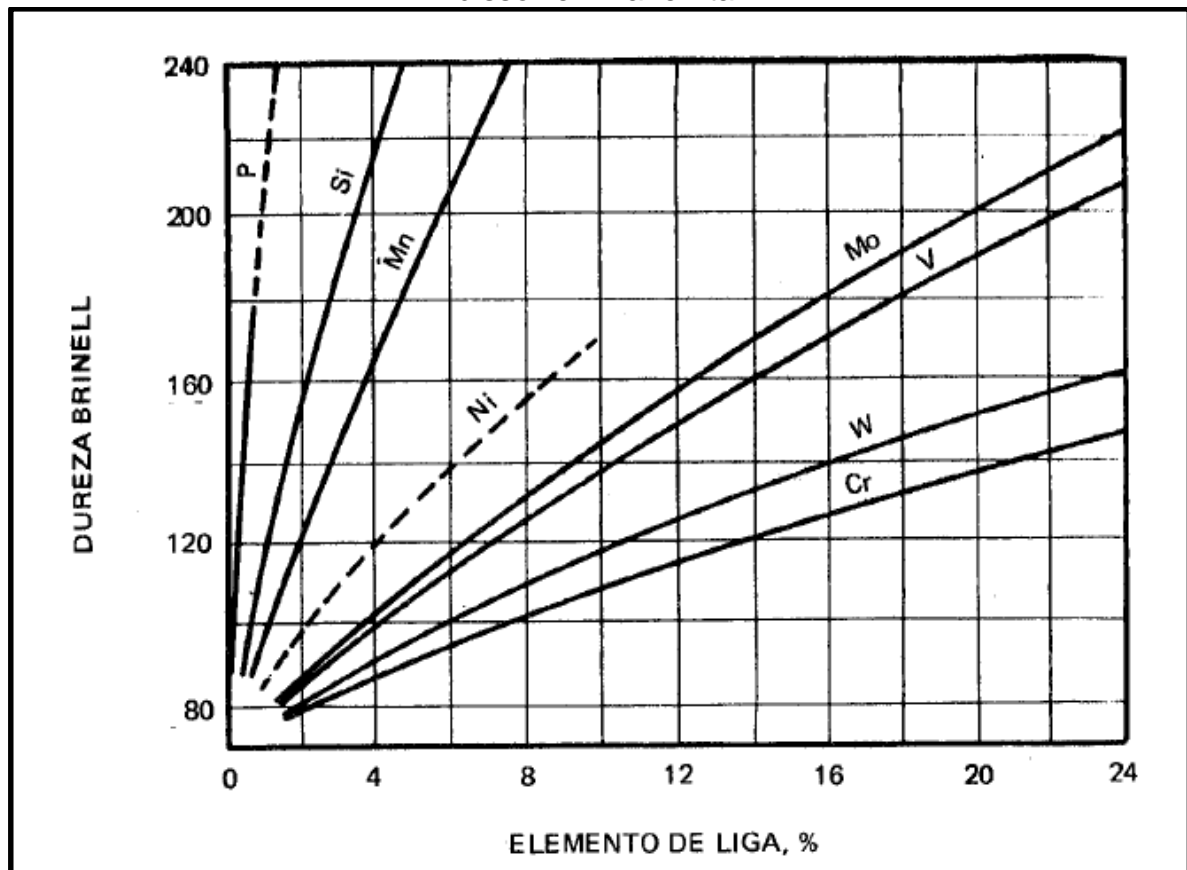
De um modo geral a introduzir-se elementos de liga nos aços visam-se os seguintes objetivos: alterar as propriedades mecânicas; aumentar a usinabilidade; aumentar a temperabilidade; conferir dureza a quente; aumentar a capacidade de corte; conferir resistência ao desgaste; conferir resistência a corrosão; conferir resistência a oxidação (a quente); modificar as características elétricas e magnéticas [13].

Os elementos de liga são adicionados em teores e em números mais variados. A não ser em casos que se desejem características especiais, como refratariedade, dureza a quente, etc. Os teores elevados de um ou mais elementos de liga são destinados exatamente para os casos em que se procuram características especiais.

Atualmente a tendência é adicionar vários elementos de liga simultaneamente, em teores baixos e médios [13].

O aumento dos valores das propriedades mecânicas como dureza e resistência a tração, é conseguido pelo fato de que os elementos de liga, além de aumentar a resistência da ferrita, formam outros carbonetos, além do  $Fe_3C$  [13]. A figura 4 mostra a ação de alguns elementos de liga que se dissolvem na ferrita, no sentido de aumentar a dureza dos aços, as ações mais positivas como observado correspondem às do fósforo, silício, manganês e níquel.

**Figura 4** - Ação relativa na dureza do aço de alguns elementos de liga que se dissolvem na ferrita.



Fonte: [13]

### 2.3.1. Vanádio

O vanádio é o elemento microligante preferido pela razão da alta solubilidade de seus carbonetos e nitretos quando comparados a outros elementos. Isto permite que o vanádio esteja em solução em temperaturas normais de reaquecimento no

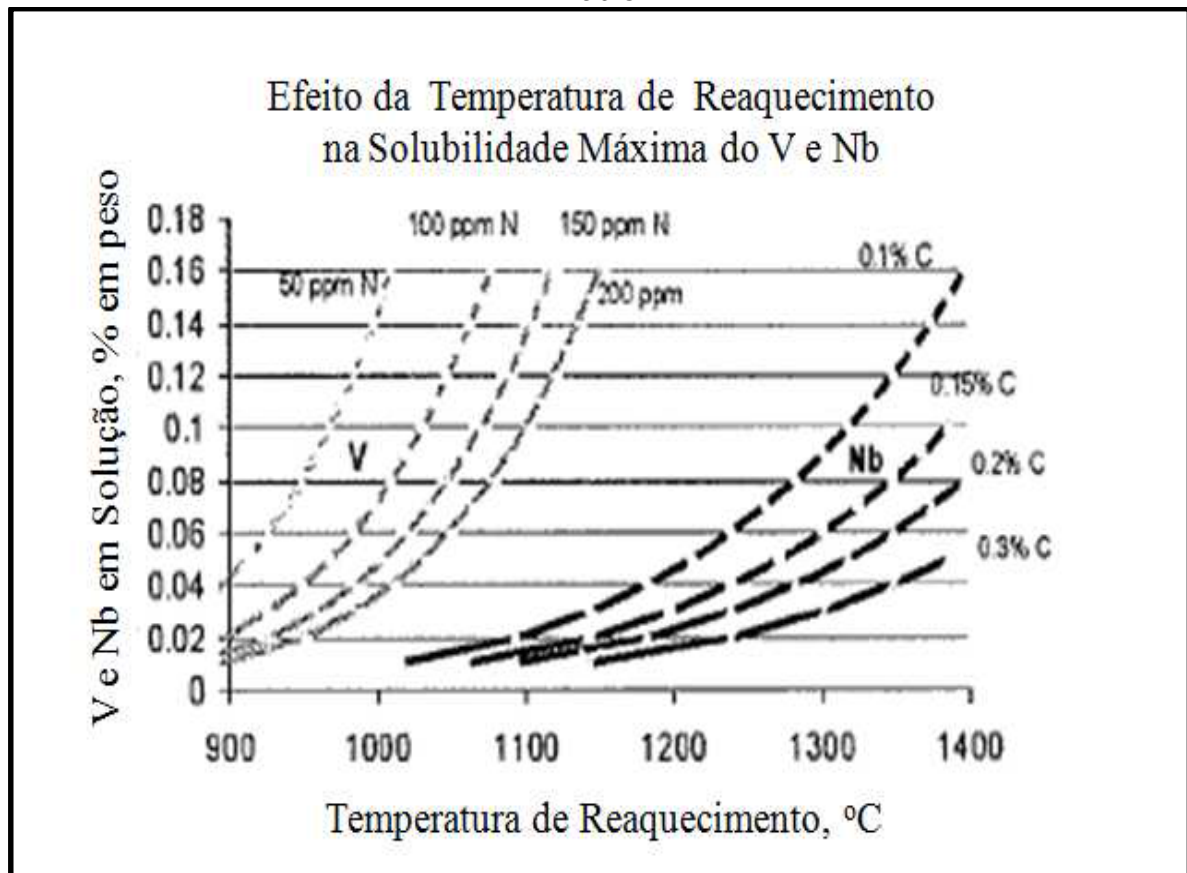
processo de laminação, somente precipitando durante o resfriamento. Temperaturas normais de reaquecimento (1150 a 1250 °C) são suficientes para a dissolução de todos os carbonetos e carbonitretos de vanádio. Como resultado, o endurecimento por adição de vanádio é proporcional à quantidade de vanádio adicionada. Esta relação linear entre adição de vanádio e aumento de resistência é extremamente útil para se estimar a quantidade de liga a ser adicionada de maneira a atingir os objetivos referentes ao aumento da resistência [14, 15].

O termo microligado significa que a quantidade do elemento químico em questão é muito baixa, geralmente teores abaixo de 0,1% em peso, os elementos microligantes são adicionados propositalmente para melhorar as propriedades mecânicas dos aços. Além das grandes diferenças de quantidade adicionada em uma liga entre elementos ligantes e microligantes, também temos diferenças em seus efeitos metalúrgicos. Enquanto elementos ligantes predominantemente afetam a matriz do aço, os elementos microligantes quase sempre afetam a microestrutura pela precipitação de uma segunda fase, desta forma o uso de microligantes tende a aumentar com o desenvolvimento de novos aços [15].

A importância das propriedades metalúrgicas do vanádio pode ser agrupada em 3 categorias principais. A primeira se trata da alta solubilidade dos carbonitretos de vanádio na austenita, a segunda, do baixo coeficiente de arraste de soluto do vanádio, e por fim, a interação positiva do vanádio com o nitrogênio o que promove um efetivo uso para o nitrogênio residual do aço [15].

Comentando sobre a primeira categoria, temos que a solubilidade do carboneto de vanádio é muito alta, se dissolvendo facilmente na austenita, e só precipitando-se no resfriamento do aço, após a ferrita ser formada. O teor de carbono não afeta a solubilidade do vanádio durante o reaquecimento para posterior laminação, desta forma temos um grande benefício na produção do aço na aciaria em função da alta solubilidade dos carbonitretos de vanádio. Como não há precipitação de carbonitretos nos contornos de grão, ocorre uma minimização das trincas do tarugo durante seu lingotamento (solidificação). O vanádio também permite que os tarugos possam ser endireitados em temperaturas mais altas após o lingotamento sem que surjam trincas transversais. A figura 5 compara o efeito da temperatura de reaquecimento necessária para solubilizar várias quantidades diferentes de vanádio e nióbio, podemos visualizar facilmente que grandes quantidades de vanádio são solubilizadas em temperaturas mais baixas quando comparadas com as mesmas quantidades de nióbio [14].

**Figura 5** - Efeito da temperatura de reaquecimento na solubilidade do vanádio e do nióbio.



Fonte: [14]

Por possuir um relativo baixo coeficiente de arraste de soluto quando comparado com outros elementos microligantes, o vanádio também se destaca. Esse arraste de soluto retarda o mecanismo de recuperação e recristalização da austenita durante os processos termomecânicos. Como um dos benefícios temos o uso do processo de laminação de recristalização controlada para refinamento do grão da austenita [14].

Por fim o vanádio possui uma afinidade natural com o nitrogênio, ou seja, quando há nitrogênio disponível, ocorre a precipitação de nitretos de vanádio resultando na redução de nitrogênio livre em solução sólida que pode contribuir para a fragilização do aço. Desta forma os altos níveis de nitrogênio geralmente associados com operações de forno elétrico a arco, que eram vistos como um problema se tornam uma vantagem para o aumento de resistência do aço [14].

Pequenas adições de vanádio no aço (< 0,1 % em peso) provocam precipitação de finas partículas (50 Å) de  $V_4C_3$  na ferrita entre 550 e 650 °C causando o



endurecimento secundário. Devido a sua capacidade de manter os carbonetos em coalescimento significativo em temperaturas de até 700 °C, o vanádio é um importante constituinte para os aços utilizados em altas temperaturas. Este elemento também eleva a temperatura do crescimento de grão da austenita promovendo o refino de grão além de que quando dissolvido aumenta a endurecibilidade do aço [16].

O vanádio é um elemento que aumenta a resistência à relaxação das molas sendo muito útil na prevenção de descarbonetação, pois diminui a atividade do carbono na austenita no processo de austenitização. O vanádio é adicionado ao aço com objetivo de refinar os grãos aumentando a tenacidade do material. Pequenos teores, menores do que 0,03% em peso, resultam em um efeito reduzido. Quantidades maiores do que 0,5% em peso não são favoráveis devido ao seu custo alto e dificuldades no processo de fabricação na aciaria [15].

Aços com outros elementos além do vanádio, do tipo (0,5 a 1 %) Cr/ (0 a 1%) Mo/ (0,25 a 0,75%) V, precipitam carbonetos de vanádio, no revenimento, pois estes são mais estáveis que os carbonetos de ferro, cromo ou molibdênio [16].

### **2.3.2. Nióbio**

O nióbio é bastante empregado nos aços inoxidáveis para evitar a sensitização, também é empregado em aços ferramentas para trabalhos em altas temperaturas. A aplicação do nióbio em aços de alta resistência com baixa liga, HSLA (high strength low alloy) é de desenvolvimento e emprego muito recente. É utilizado com porcentagens de 0,001 até 0,1%, podendo substituir às vezes, o vanádio e outros elementos de liga. O uso e desenvolvimento de aços de nióbio vem ganhando um papel de grande interesse atualmente, principalmente para o Brasil, visto que possuímos a maior reserva de pirocloro (minério de nióbio) do mundo, localizada em Araxá – MG [16].

### **2.3.3. Silício**

O silício é empregado na fabricação do aço como desoxidante. Além disso, aumenta a resistência da ferrita, sem sacrificar a ductilidade e a tenacidade, para porcentagens de até 1%. Na maioria dos aços a porcentagem de silício chega até 0,3% no máximo. Também aumenta a resistência a oxidação, a endurecibilidade dos

aços contendo elementos não grafitizantes e a resistência dos aços de baixo teor em liga [16].

#### **2.3.4. Manganês**

O manganês é utilizado para controlar os efeitos negativos do enxofre, formando inclusões de MnS, contrabalançando a fragilidade causada pelo S, além de ser usado como desoxidante. Para essa finalidade sua adição geral é menor que 1%, já para aços estruturais teores de até 1,5% são usuais. O manganês ainda aumenta a endurecibilidade economicamente [16].

#### **2.3.5. Cobre**

O cobre em quantidades de até 1,5%, dissolve-se na ferrita, aumentando a resistência à corrosão atmosférica e a temperabilidade. Quando ultrapassa esse limite começa a produzir endurecimento por precipitação, reduzindo a ductilidade a quente [16].

Desta forma deve se ter um controle adequado da concentração máxima de cobre no aço em questão, de acordo com as características finais esperadas para o produto.

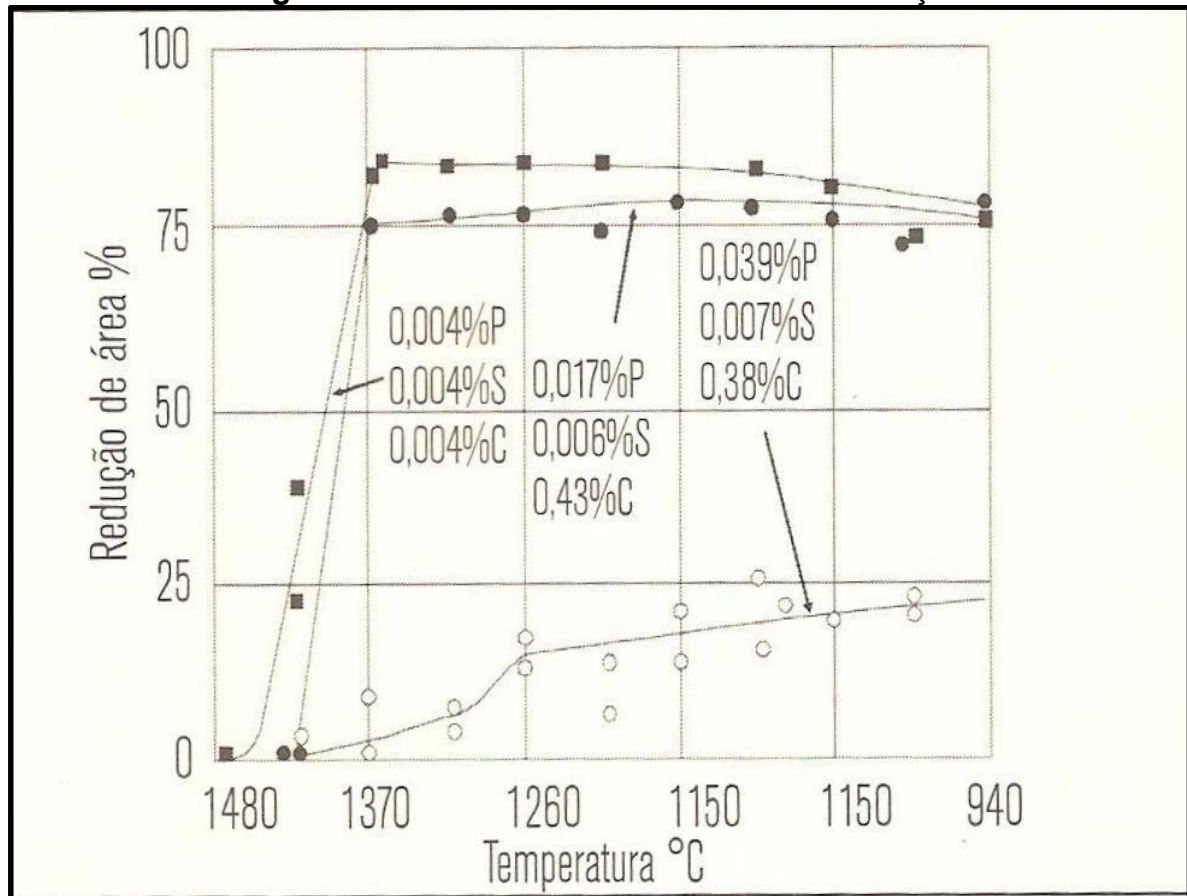
### **2.4. EFEITO DAS IMPUREZAS**

#### **2.4.1. Fósforo**

O fósforo dissolve-se na ferrita, endurecendo-a, e causando fragilidade a frio. O que significa uma baixa resistência ao choque e uma baixa tenacidade, o que é acentuado pelo aumento da porcentagem de carbono. Também é responsável pelo fenômeno de fragilidade no revenido. Desta forma o teor máximo deste elemento é rigorosamente controlado nos aços e situa-se entre 0,005 e 0,1%, dependendo da qualidade desejada e da aplicação que se destina o aço. Por outro lado o fósforo apresenta algumas vantagens, como aumento da resistência ao desgaste e a corrosão, melhoria da usinabilidade dos aços de corte rápido e aumento na resistência mecânica [16].

O fósforo ainda tem grande influência sobre a ductilidade do aço, em temperaturas de 1340 °C até a temperatura *solidus*, pois nessas temperaturas formam segregados devido a rejeição de soluto [17]. A figura 6 evidencia a forte influência do fósforo sobre a ductilidade do aço.

**Figura 6** – Efeito do fósforo na ductilidade do aço.



Fonte: [17]

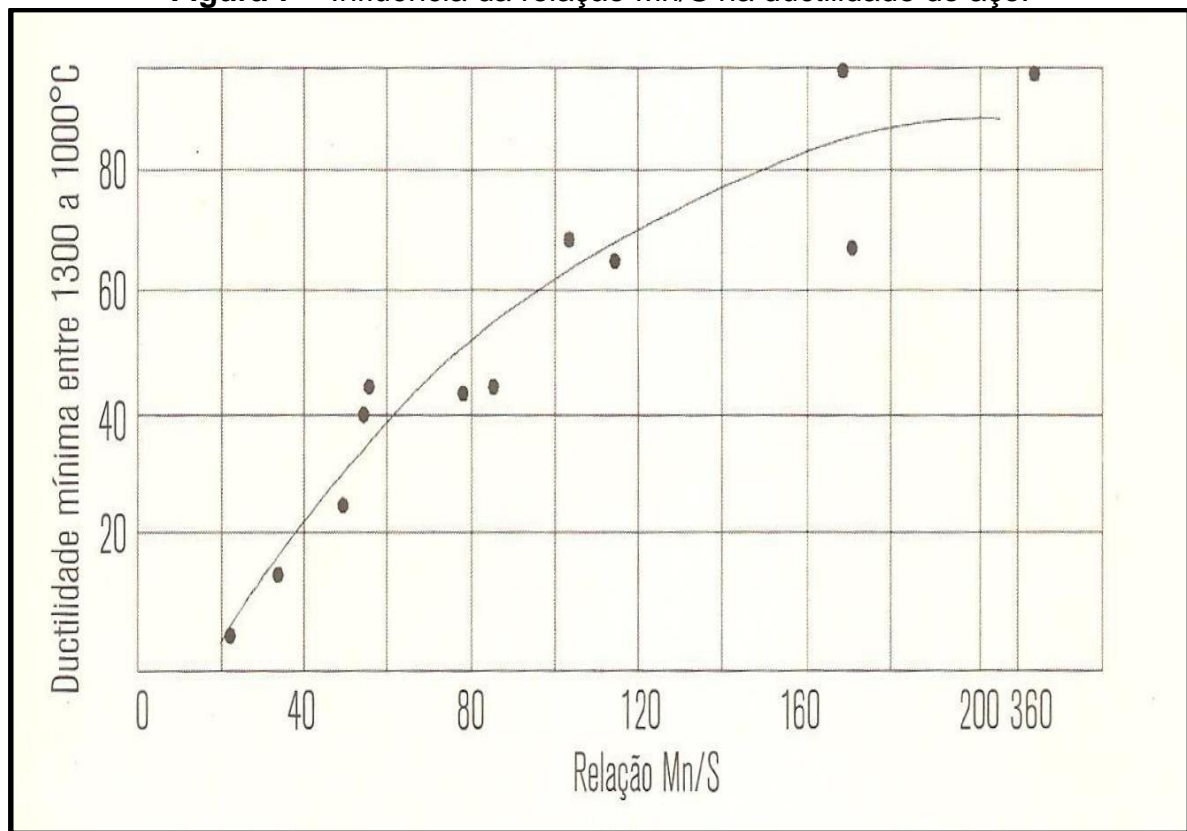
Todavia o fósforo é considerado como uma impureza, visto que seus aspectos negativos prevalecem nas propriedades finais dos aços.

#### 2.4.2. Enxofre

Na formação do FeS, o enxofre torna os aços frágeis durante o processo de trabalho a quente. Quando combinado com o enxofre o manganês forma o sulfeto (MnS) e elimina este problema, desde que a relação Mn/S e o teor máximo de S sejam adequadamente controlados [16].

Em faixas de temperaturas de 800 a 1200 °C a ductilidade dos aços é fortemente influenciada pela relação Mn/S, a baixa ductilidade resulta da precipitação de FeS nos contornos de grão da austenita, propiciando a nucleação de trincas nessa região. Em aços com relações de Mn/S superiores a 60, o enxofre é confinado numa fase estável (MnS), que precipita na matriz austenítica e não no contorno de grão [17]. O gráfico da figura 7 mostra a ductilidade do aço em função da relação Mn/S de um estudo realizado para a faixa de temperaturas entre 1000 e 1300 °C.

**Figura 7 – Influência da relação Mn/S na ductilidade do aço.**



Fonte: [17]

### 2.4.3. Estanho

Sua presença está relacionada com chapas soldadas ou estanhadas presentes na sucata, originando superfícies defeituosas e grande fragilidade no trabalho a quente. Nos aços temperados e revenidos, o estanho apresenta uma grande contribuição para a fragilidade no revenido, desta forma podemos considerar o estanho como uma impureza que tem os mesmos efeitos prejudiciais do fósforo [16].

#### 2.4.4. Nitrogênio

O nitrogênio, quando combinado com o alumínio, vanádio e cromo, forma nitretos que confere ao aço uma grande resistência ao desgaste e elevada dureza. Também provoca o endurecimento por precipitação, além de dissolver-se na ferrita endurecendo-a e podendo formar o nitreto de ferro. O nitrogênio também contribui para a ocorrência de escoamento nítido, prejudicial para chapas para embutimento profundo [16].

Todavia o nitrogênio é considerado uma impureza na maioria dos aços, onde sua concentração em ppm deve ser devidamente controlada. Devido ao pequeno tamanho de suas moléculas, se torna fácil a difusão do mesmo e que gera o acentuado aumento da dureza e aparecimento de defeitos nos produtos finais.

#### 2.5. ANÁLISE MICROSCÓPICA

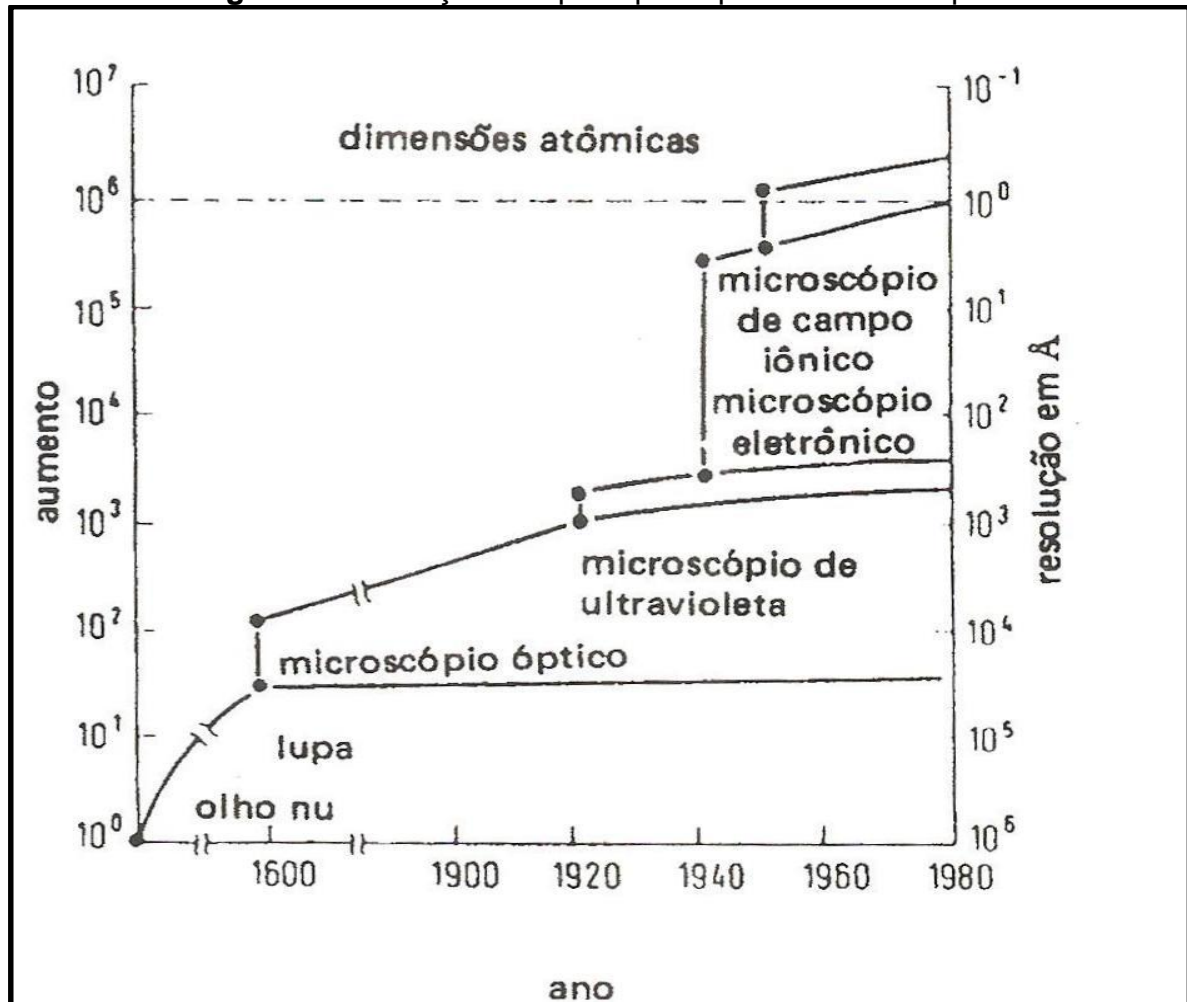
As propriedades dos materiais são em última análise determinadas pelas suas respectivas microestruturas, isto é, pelos defeitos e constituintes microestruturais que eles contêm. A microestrutura dos materiais normalmente apresenta defeitos e constituintes dentro de uma ampla faixa de dimensões. A importância do conhecimento e das análises quantitativas da microestrutura tem levado a um contínuo desenvolvimento das técnicas experimentais, particularmente da microscopia [18].

O exame microscópico é uma ferramenta extremamente útil no estudo e na caracterização dos materiais. Aplicações importantes das análises microestruturais são: assegurar que as associações entre propriedades e a estrutura (e os defeitos) sejam compreendidas da forma correta; prever as propriedades dos materiais uma vez que essas relações tenham sido estabelecidas; projetar ligas com novas combinações de propriedades; determinar se um material foi ou não tratado termicamente da maneira correta; e verificar o modo de uma fratura mecânica [10].

No estudo dos materiais de engenharia três tipos de microscopia são utilizados em grande extensão: microscopia óptica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microscopia eletrônica de transmissão (MET). Em menor extensão, mas em uma faixa exclusiva de resolução, encontra-se a microscopia de campo iônico (MCI) [18].

A figura 8 mostra a evolução dos principais tipos de microscopia e a tabela 4 apresenta algumas características para efeito de comparação entre as mesmas.

**Figura 8** – Evolução dos principais tipos de microscopia.



Fonte: [18]

É importante destacar que estas técnicas são complementares na maioria dos casos; cada uma delas tem seu campo específico de aplicação. Porém destacando a principal potencialidade de cada uma, temos que: [18]

- a microscopia ótica permite a análise de grandes áreas, além de ser de utilização simples, rápida e pouco dispendiosa;
- a microscopia eletrônica de varredura, por apresentar excelente profundidade de foco, permite a análise de superfícies irregulares, como superfícies de fratura;
- a microscopia eletrônica de transmissão permite análise de defeitos e fases internas dos materiais, como discordâncias, falhas de empilhamento e pequenas partículas de outra fase;

- a microscopia de campo iônico, por apresentar excelente resolução, permite estudos difíceis de serem realizados com as outras técnicas, tais como defeitos puntiformes, “estrutura” de contornos e de interfaces.

**Tabela 4** - Algumas características da microscopia.

<b>Característica</b>	<b>Microscopia Ótica</b>	<b>Microscopia Eletrônica de Varredura</b>	<b>Microscopia Eletrônica de Transmissão</b>	<b>Microscopia de Campo Iônico</b>
<b>Faixa Útil de Aumento</b>	1 - 1500 X	10 - 20.000 X	500 - 300.000 X	~ 10 <sup>6</sup> X
<b>Profundidade de foco em 1000 X</b>	0,1 µm	0,1 mm	10 µm	-
<b>Máxima densidade de discordâncias medida (cm/cm<sup>3</sup>)</b>	10 <sup>5</sup> cavidades de corrosão	10 <sup>6</sup> cavidades de corrosão	10 <sup>12</sup> lâmina fina	-
<b>Tensão de aceleração (Kv)</b>	-	10 - 50	100 - 1000	5 - 15

Fonte: [Adaptada, 18]

### 2.5.1. Microscopia Óptica

Na microscopia óptica, o microscópio óptico é utilizado para estudar a microestrutura; sistemas ópticos e de iluminação são os seus elementos básicos. Para materiais que são opacos à luz visível (todos os metais e muitos cerâmicos e polímeros), apenas a superfície do material é submetida à observação e o microscópio óptico deve ser usado no modo de reflexão. Os contrastes na imagem produzida resultam das diferenças na refletividade das várias regiões da microestrutura. As investigações desse tipo são chamadas frequentemente de metalográfica, uma vez que os metais foram os primeiros materiais a ser examinados com o emprego dessa técnica.

É necessária uma preparação cuidadosa e meticulosa da superfície para revelar os detalhes importantes de sua microestrutura, essas etapas do ensaio micrográfico serão expostas mais adiante.

O microscópio apresenta dois sistemas de lentes convergentes; a objetiva e a ocular. A objetiva é um conjunto de lentes que apresenta pequena distância focal e

que fornece uma imagem real e aumentada do objeto que é observado. A ocular, também formada por lentes convergentes, funciona como uma lupa, que nos dá uma imagem virtual e aumentada da imagem real que se formou através da objetiva [10].

## 2.6. ANÁLISE METALOGRAFICA

A análise metalográfica consiste em correlacionar a estrutura do material com suas propriedades físicas, o processo de fabricação e o desempenho na aplicação desejada. Este ensaio divide-se em macrográfico e micrográfico, e, para sua realização é necessária uma prévia preparação da amostra. O processo de caracterização metalográfico compreende três etapas distintas; lixamento, polimento e ataque. Do lixamento e polimento da peça a ser analisada resulta uma superfície lisa e “espelhada” [19].

No ensaio macrográfico a amostra é examinada a olho nu ou com ampliação de até 50X após ser lixada, polida e atacada devidamente. Esta análise visual possibilita a identificação de eventuais falhas contidas no material, homogeneidade aparente, impurezas, processo de fabricação, qualidade aparente de solda entre outras características [19].

O ensaio micrográfico, consiste no estudo dos produtos metalúrgicos, com o auxílio do microscópio, onde se pode observar as fases presentes e identificar a granulação do material (tamanho de grão), o teor aproximado de carbono no aço, a natureza, a forma, a quantidade, e a distribuição dos diversos constituintes ou de certas inclusões [10].

Para se observar a microestrutura pós-ataque químico se faz necessário a ocorrência de certo grau de contraste entre as microconstituintes do metal, o que pode ser obtido através de algumas medidas: o polimento da superfície deve ser eficaz não contendo riscos, a amostra a ser atacada deve estar limpa isto é sem resíduos do material usado no polimento, o reagente deve ser selecionado, preparado e aplicado sob condições de ataque adequadas e controlada. Existem várias formas e métodos para realização do ataque químico, o determinante para a escolha de um, é em geral, a forma ou dimensão da amostra e podem ser escolhidos de acordo com a experiência e objetivo de seu usuário, entre os métodos de ataque pode-se citar: a imersão, gotejamento, lavagem e esfregamento [19].



## 2.7. ANÁLISE DO AÇO POR ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ATÔMICA

A espectrometria aplicada para análise de aço surgiu da necessidade de acelerar o processo de análise, onde até então se utilizavam métodos de via úmida, que eram demorados e de alto custo. Alguns elementos poderiam ser determinados em meia hora, tais como Mn, Cr, Ni, Mo, Cu e V, e outros de 8 a 12h, como Si, W, Al, Zr, Ti, B e Co [20].

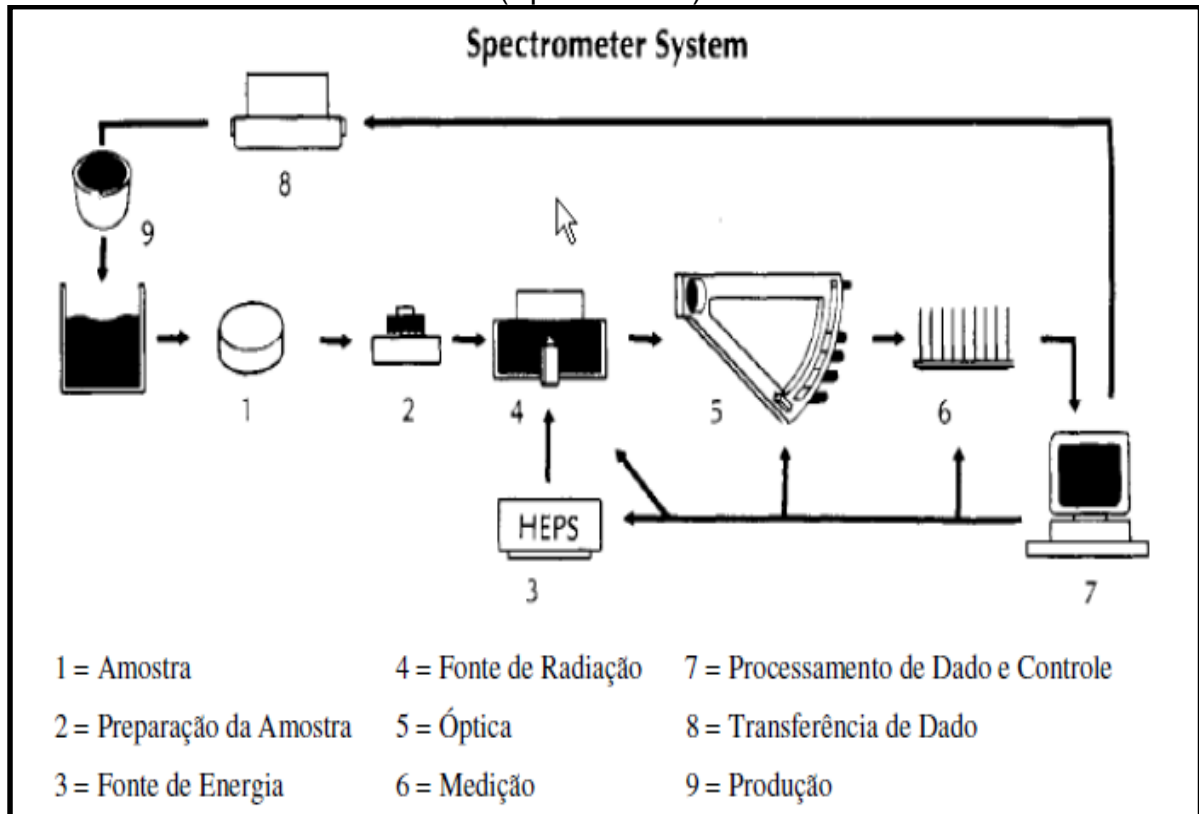
A espectrometria de emissão atômica por centelha começou a ser estudada a partir de 1901 e iniciou aplicação generalizada para análise elementar no início da década de 30. A espectrometria de emissão atômica com fonte de plasma teve grande desenvolvimento na década de 70. O espectro ótico de emissão atômica é composto por uma região do espectro de emissão da luz (fótons), onde se relaciona a energia emitida em um determinado comprimento de onda. Cada elemento terá um espectro de emissão atômica característico, sendo a concentração proporcional à intensidade desses fótons [20].

No caso do espectrômetro de emissão óptica a excitação da amostra ocorre por eletrodos quando se usa a centelha como fonte. A passagem de eletricidade do eletrodo pela amostra promove a energia necessária para atomizar a amostra e excitar os átomos resultantes para um estado eletrônico mais alto [20].

A análise quantitativa por centelha demanda um controle preciso das muitas variáveis envolvidas na preparação e excitação da amostra. Soma-se a isso o fato de as medidas quantitativas requererem um conjunto de padrões cuidadosamente preparados para a calibração. Esses padrões devem aproximar-se o mais possível da composição e das propriedades físicas das amostras a serem analisadas. Em todas as técnicas de análise de espectrometria de emissão a concentração da amostra é determinada com auxílio de uma curva de calibração construída com padrões. A intensidade dos fótons é proporcional à concentração do elemento que gerou esses fótons. Uma vez que padrões e amostras são excitados em condições idênticas pode-se determinar a concentração dos elementos por comparação com a curva de calibração [20].

A figura 9 representa um esquema de um espectrômetro de emissão óptica (espectrômetro com fonte de centelha), aplicado a indústria metalúrgica.

**Figura 9** – Representação esquemática de um espectrômetro de emissão óptica (Spark – AES).



Fonte: [20]

## 2.8. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

A determinação das propriedades mecânicas de um material metálico é realizada por meio de vários ensaios. Geralmente esses ensaios são destrutivos, pois promovem a ruptura ou inutilização do material. Existem ainda os ensaios chamados não-destrutivos, utilizados para a determinação de algumas propriedades físicas do metal, bem como para detectar falhas internas do mesmo. Na categoria dos ensaios destrutivos, estão classificados os ensaios de tração, dobramento, flexão, torção, fadiga, impacto, compressão e outros. O ensaio de dureza, que, embora possa, em certos casos, não inutilizar a peça ensaiada, também está incluído nessa categoria. Dentre os ensaios não-destrutivos, estão os ensaios com *raios X*, *ultra-som*, *Magnaflux*, *elétricos* e outros [21].

A escolha do ensaio mecânico mais interessante ou mais adequado para cada produto metálico depende da finalidade do material, dos tipos de esforços que esse material vai sofrer, e das propriedades mecânicas que se deseja medir [21].

Todos os ensaios possuem de modo geral duas finalidades mais importantes. Primeiramente permitir a obtenção de informações rotineiras do produto – ensaios de controle: no recebimento de materiais de fornecedores e no controle final do produto acabado; como também desenvolver novas informações sobre os materiais, no desenvolvimento de novos materiais, de novos processos de fabricação e de novos tratamentos [22].

Para a caracterização do aço em questão utilizou-se os ensaios de dureza, dobramento, impacto e tração.

## 2.9. ENSAIO DE DUREZA

Os diversos ensaios de dureza existentes possibilitam uma excelente cobertura de todas as gamas usuais de dureza e dimensões encontradas nos aços, o ensaio de dureza corretamente escolhido e interpretado é uma ferramenta excelente para o controle indireto das propriedades mecânicas, a baixíssimo custo, comparado com as demais opções existentes [16].

A dureza de um material depende diretamente das forças de ligação entre átomos, íons ou moléculas, assim como da resistência mecânica. A dureza dos metais pode ser aumentada por tratamentos especiais, como adição de soluto, trabalho a frio, endurecimento por precipitação ou tratamentos térmicos específicos. Há uma ligação bastante próxima entre o limite de escoamento dos metais e a sua dureza [22].

Visto que dependendo da área científica de estudo a dureza recebe um significado distinto, podemos dividir o ensaio de dureza em três tipos principais, que dependem da maneira com que o ensaio é conduzido: por penetração por choque e por risco, sendo que o terceiro tipo ser raramente empregado para os metais.

### 2.9.1. Dureza por risco

Este tipo de ensaio é pouco utilizado nos materiais metálicos, encontrando maior aplicação no campo da mineralogia. Vários minerais podem ser relacionados com outros materiais na sua capacidade de riscar uns aos outros. Entre os ensaios por risco, a dureza Mohs é a mais conhecida, e consiste em uma escala de 10 minerais padrões organizados de tal forma que o mais duro (diamante – dureza ao risco 10) risca todos os outros [22].

### **2.9.2. Dureza por choque**

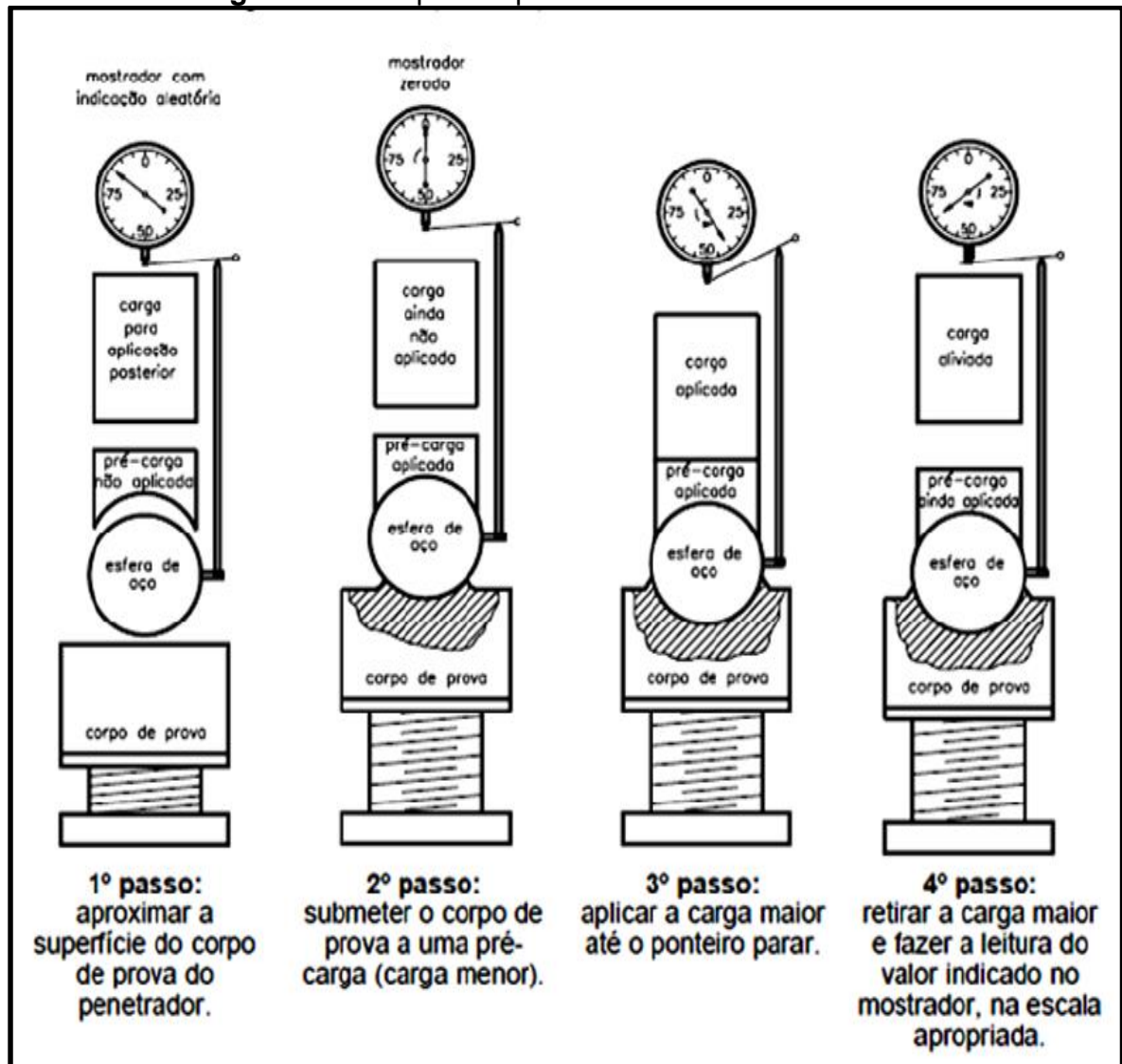
A dureza por choque é um ensaio dinâmico que produz a impressão num corpo de prova por meio de um penetrador que bate a sua superfície plana. Esse choque é produzido pela queda livre de um êmbolo, tendo em sua ponta um penetrador. O valor da dureza obtido é proporcional à energia de deformação consumida para formar a marca no corpo de prova e representada pela altura alcançada no rebote do êmbolo. Desses métodos destaca-se a dureza Shore, que se utiliza de uma barra de aço de peso 2,5 N (0,250 kgf), com uma ponta arredondada de diamante colocada dentro de um tubo de vidro com uma escala graduada de 0 a 140.

### **2.9.3. Dureza por penetração**

A dureza por penetração é a dureza mais utilizada atualmente, existem vários tipos de equipamentos e durômetros de bancada que realizam esse tipo de dureza não mais diversas escalas existentes, dessa forma este tipo de dureza vem aumentado muito com o avanço tecnológico.

De um modo geral na dureza por penetração aplica-se uma pré carga, para garantir um contato firme entre o penetrador e o material ensaiado, depois, aplica-se a carga do ensaio propriamente dita. A leitura do grau de dureza é feita diretamente no mostrador acoplado à máquina de ensaio, de acordo com uma escala pré-determinada, adequada à faixa de dureza do material. A figura 10 mostra as etapas principais de um processo de dureza.

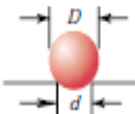
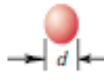
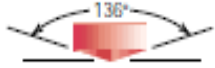

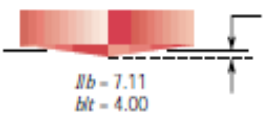
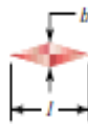


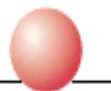

Figura 10 – Etapas do processo de ensaio de dureza.



Fonte: [23]

Existem 3 tipos principais de escala de dureza por penetração, a dureza Brinell, a dureza Rockwell e dureza Vickers. A figura 11 exemplifica essas técnicas de forma um pouco mais detalhada.

Figura 11 – Técnicas de ensaio de dureza

Test	Indenter	Shape of Indentation		Load	Formula for Hardness Number <sup>a</sup>
		Side View	Top View		
Brinell	10-mm sphere of steel or tungsten carbide			$P$	$HB = \frac{2P}{\pi D[D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Vickers microhardness	Diamond pyramid			$P$	$HV = 1.854P/d_1^2$
Knoop microhardness	Diamond pyramid			$P$	$HK = 14.2P/l^2$
Rockwell and Superficial Rockwell	<ul style="list-style-type: none"> <li>Diamond cone</li> <li><math>\frac{1}{16}, \frac{1}{8}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}</math> in. diameter</li> <li>steel spheres</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>60 kg</li> <li>100 kg</li> <li>150 kg</li> </ul> Rockwell	
				<ul style="list-style-type: none"> <li>15 kg</li> <li>30 kg</li> <li>45 kg</li> </ul> Superficial Rockwell	

Para as fórmulas de durezas dadas, P (a carga aplicada está em kg, enquanto D, d,  $d_1$  e l estão todos em mm.

Fonte: [12]

#### 2.9.4. Dureza Rockwell

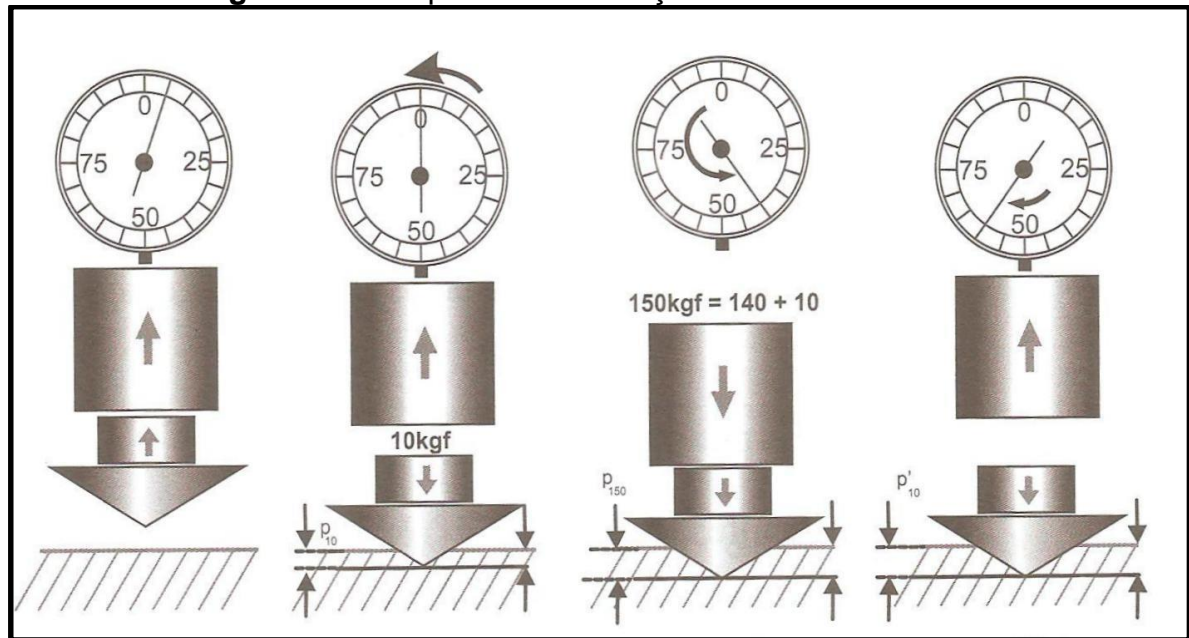
A dureza Rockwell consiste basicamente em medir a profundidade de penetração de uma ponta como num relógio comparador, após a retirada da aplicação de uma carga maior, tendo sido inicialmente aplicada uma carga menor pré-estabelecida. Os penetradores utilizados são do tipo esférico (aço temperado) o cônico (penetrador-Brale, 120° de conicidade) [24].

O ensaio Rockwell segue a seguinte sequência de aplicação: Primeiramente com qualquer dos penetradores a carga menor é aplicada para fixar bem o corpo de prova (10 Kgf). Nesta etapa a escala do DIAL é zerada, logo após aplica-se e retira-se a carga maior depois de um intervalo de 30 segundos. Retirada a carga maior, a profundidade da impressão é dada diretamente no mostrador da máquina, em forma de número de dureza, após voltar a carga ao valor menor [24].

A escala Rockwell pode ser realizada em dois tipos de máquinas, diferentes entre si pela precisão de seus componentes: a máquina padrão que mede a dureza

Rockwell comum e a máquina mais precisa mede a dureza Rockwell superficial [24]. A figura 12 representa essa sequência

**Figura 12 – Sequência na medição da dureza Rockwell.**



Fonte: [24]

A dureza Rockwell comum emprega várias escalas independentes umas das outras, que dependem da penetração. Um número alto de dureza corresponde a uma pequena profundidade da impressão e um número baixo, a uma impressão profunda. Por isso, as escalas da máquina são invertidas para se ler o valor de dureza diretamente. As escalas cobrem toda a gama de dureza encontradas nos metais. A pré carga da dureza Rockwell comum sempre será 10 Kgf [21]. A norma ASTM, E18 descreve todos os passos para a realização do ensaio de dureza Rockwell [25].

A tabela 5 exibe as escalas usadas com o tipo de penetrador, as cargas maiores e algumas aplicações de cada escala.

**Tabela 5** – Escalas de dureza Rockwell e dureza típicas.

<b>Símbolo de Escala</b>	<b>Penetrador</b>	<b>Carga Maior (kgf)</b>	<b>Cor da Escala</b>	<b>Aplicações das Escalas</b>
<b>B</b>	Esfera de 1,59 mm $\phi$	100	Vermelha	Ligas de cobre, aços moles, ligas de alumínio, ferro maleável, etc.
<b>C</b>	Diamante	150	Preta	Aço, fofo duro, fofo maleável perlítico, titânio, aço endurecido, e outros metais mais duros que HR <sub>B</sub> = 100.
<b>A</b>	Diamante	60	Preta	Carbonetos cementados, aço fino, e aço endurecido de baixa camada de endurecimento.
<b>D</b>	Diamante	100	Preta	Aplicações de aço com camada de endurecimento entre os dois casos acima mencionados, fofo maleável perlítico.
<b>E</b>	Esfera de 3,17 mm $\phi$	100	Vermelha	Fofo, ligas de Al e Mg, metais para mancais.
<b>F</b>	Esfera de 1,59 mm $\phi$	60	Vermelha	Ligas de Cu recozidas, chapas finas de metais moles.
<b>G</b>	Esfera de 1,59 mm $\phi$	150	Vermelha	Fofo maleável, ligas de Cu-Ni-Zn, cupro-níqueis. Aplicações até HR <sub>G</sub> = 92 para evitar achatamento da esfera, alumínio, zinco, chumbo.
<b>H</b>	Esfera de 3,17 mm $\phi$	60	Vermelha	Metais para mancais e outros metais muito moles ou finos. Usar a menor esfera e maior carga possíveis.
<b>K</b>	Esfera de 3,17 mm $\phi$	150	Vermelha	
<b>L</b>	Esfera de 6,35 mm $\phi$	60	Vermelha	
<b>M</b>	Esfera de 6,35 mm $\phi$	100	Vermelha	
<b>P</b>	Esfera de 6,35 mm $\phi$	150	Vermelha	
<b>R</b>	Esfera de 12,70 mm $\phi$	60	Vermelha	
<b>S</b>	Esfera de 12,70 mm $\phi$	100	Vermelha	
<b>V</b>	Esfera de 12,70 mm $\phi$	150	Vermelha	

**Fonte:** [Adaptada, 21]

A dureza Rockwell superficial emprega igualmente várias escalas independentes e é utilizada para corpos de prova de pequena espessura, e para metais que sofreram algum tratamento superficial, como cementação, nitretação, dentre outros. No caso da dureza Rockwell superficial, a pré carga é sempre de 3 Kgf [21]. A tabela 6 mostra as várias escalas, cargas maiores e algumas aplicações.



**Tabela 6** – Escala de dureza Rockwell superficial e aplicações típicas.

Escala Maior (kgf)	Escala N (Penetração do diamante)	Escala T (Esfera 1,59 mm)	Escala W (Esfera 3,17 mm)	Escala X (Esfera 6,35 mm)	Escala Y (Esfera 12,70 mm)
15	15-N	15-T	15-W	15-X	15-Y
30	30-N	30-T	30-W	30-X	30-Y
45	45-N	45-T	45-W	45-X	45-Y

Escala	
<b>N</b>	Metais similares aos usados pelas escalas C, A e D
<b>T</b>	Metais similares aos usados pelas escalas B, F e G
<b>W</b>	Materiais muito moles
<b>X</b>	
<b>Y</b>	

Fonte: [Adaptada, 21]

## 2.10. ENSAIO DE DOBRAMENTO

O ensaio de dobramento fornece uma informação qualitativa da ductilidade do material. Por ser um ensaio de realização bastante simples, ele é largamente utilizado nas indústrias e laboratórios, constando o mesmo nas especificações de todos os países, onde são exigidos requisitos de ductilidade para um certo material. O ensaio de dobramento comum não determina nenhum valor numérico, havendo porém variações do ensaio que permitem obter valores de certas propriedades mecânicas do material. Consiste em dobrar um corpo de prova de eixo retilíneo e seção circular, retangular ou quadrada, assentado em dois apoios afastados a uma distância especificada. Através do cutelo é aplicada uma força perpendicular ao eixo do corpo de prova, até que seja atingido um ângulo desejado, que é geralmente 90, 120 ou 180° [21].

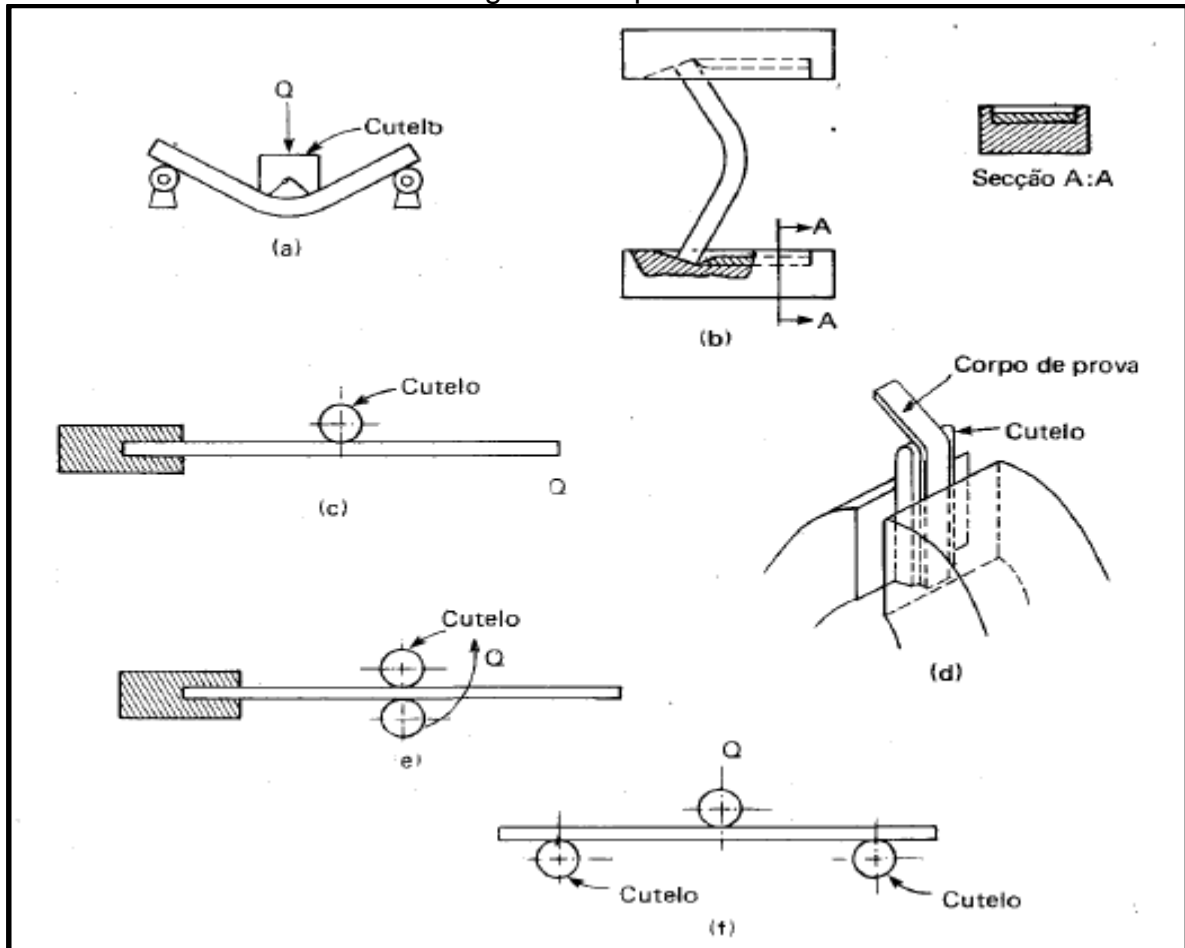
Depois da realização do ensaio, se a zona tracionada do material não apresentar trincas, fendas ou fissuras ele está aprovado

Existem dois tipos de ensaio de dobramento o livre e o semiguiado. Na primeira o dobramento é obtido pela aplicação de força nas extremidades do corpo de prova, sem aplicação de força no ponto de máximo dobramento (zona tracionada), na segunda uma extremidade é engastada de algum modo e o dobramento é efetuado na outra extremidade ou em outro local do corpo de prova [21].

A norma ABNT – NBR 6153 descreve todos os passos para a aplicação do dobramento semiguiado [26].

A figura 13 esquematiza algumas formas de dobramento livre e dobramento semiguiado.

**Figura 13** – (a) e (b) dobramento livre esquemático, (c), (d), (e) e (f) dobramento semiguiado esquemático.



Fonte: [21]

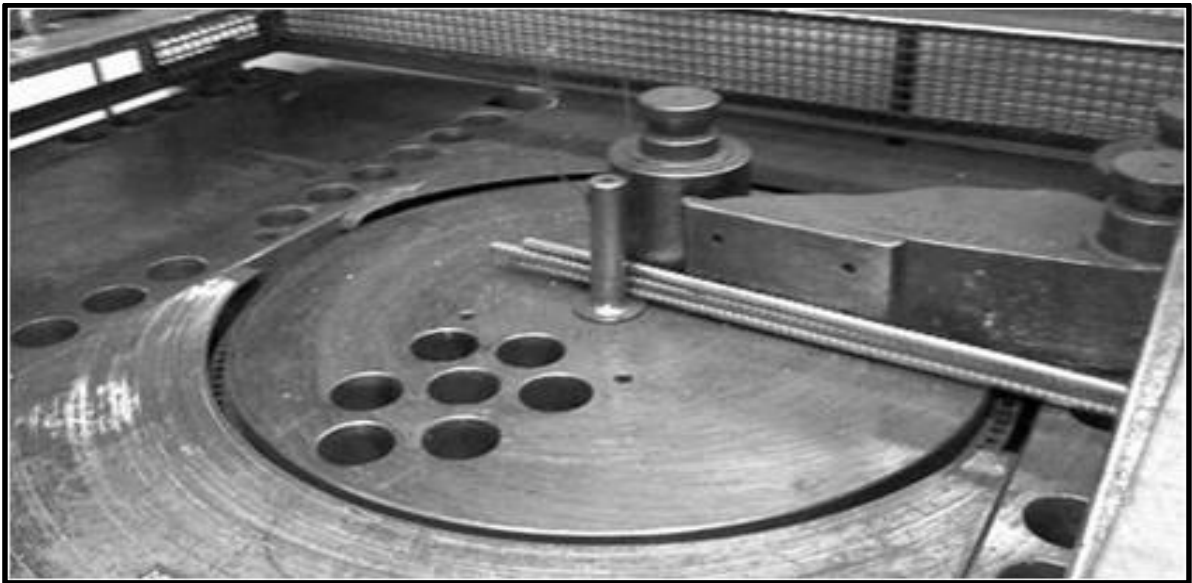
Existe um caso particular de dobramento em barras para a construção civil, sendo de grande importância visto que essas barras normalmente necessitam de dobramento na sua aplicação prática. A especificação brasileira EB-3 de 1980 divide as barras de construção civil em várias categorias, a saber: CA-25, CA 32, CA 40, CA 50 e CA 60. O ensaio de dobramento dessas barras é realizado até atingir o ângulo de 180°, tendo o cutelo um diâmetro que depende da categoria da barra. O número da categoria se refere ao valor mínimo do limite de escoamento que a barra deve ter em Kgf/mm<sup>2</sup> [21].

O dobramento para esses tipos de materiais é do tipo guiado ou semiguiado, e avalia-se a existência de fissuras, ou trincas na zona tracionada, caso a barra não

possua as mesmas é enquadrada na categoria que foi fabricada, porém ainda é recomendado que se realize o ensaio de tração para se confirmar a qualidade da barra.

A figura 14 apresenta um modelo de máquina de dobramento elétrica com amostras de vergalhões prontas para serem ensaiadas.

**Figura 14** – Máquina de dobramento elétrica com amostras de vergalhões para o dobramento de 180°.



Fonte: [14]

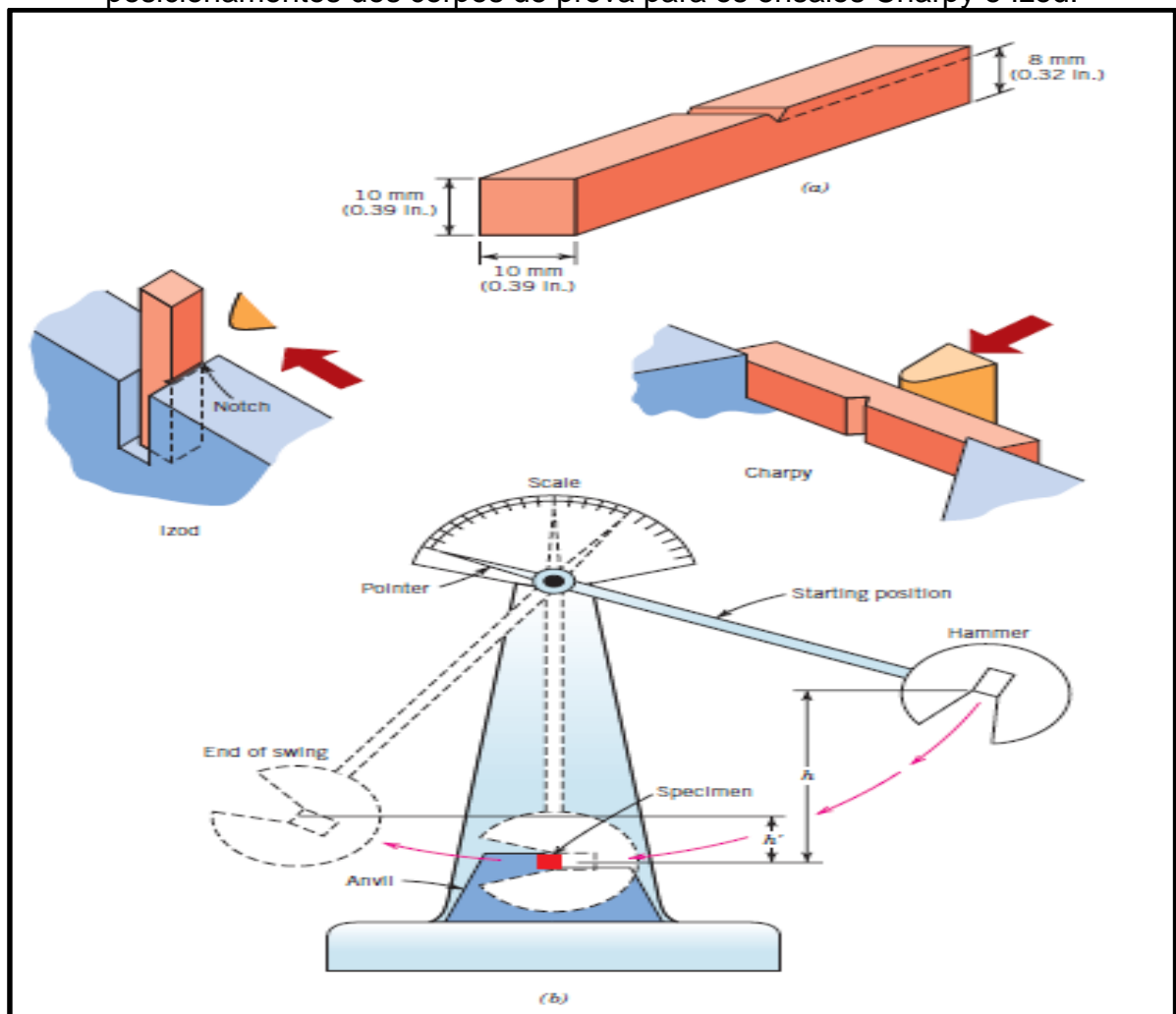
## 2.11. ENSAIO DE IMPACTO

O ensaio de impacto é principalmente empregado para o estudo da fratura frágil nos metais. Este ensaio também é denominado ensaio de choque ou impropriamente ensaio de resiliência, é um ensaio dinâmico usado principalmente para materiais em baixa temperatura, como teste de aceitação do material.

Assim, a tendência de um metal de se comportar de uma maneira frágil é medida pelo ensaio de impacto. Ou seja, o corpo de prova é padronizado e provido de um entalhe para localizar a sua ruptura e produzir um estado triaxial de tensões, quando ele é submetido a uma flexão por impacto, produzida por um martelo pendular. Desta forma, a energia que o corpo de prova absorve, para se deformar e romper, é medida pela diferença entre a altura atingida pelo martelo antes e após o impacto, multiplicada pelo peso do martelo. Vale ressaltar que, nas máquinas em geral, essa energia é medida na própria máquina através de um ponteiro que corre numa escala

graduada, já convertida em unidade de energia [27]. A figura 15 mostra a máquina utilizada nos ensaios de impacto, esquematizando os dois tipos de corpos de prova utilizados no ensaio de Charpy e Izod.

**Figura 15** – (a) Corpo de prova utilizado em ensaios de impacto Charpy e Izod. (b) Um desenho esquemático de um equipamento para ensaios de impacto. O martelo é liberado de uma altura fixa  $h$  e atinge o corpo de prova; a energia gasta na fratura é refletida pela diferença entre  $h$  e a altura do balanço  $h'$ . Também estão mostrados os posicionamentos dos corpos de prova para os ensaios Charpy e Izod.



Fonte: [2]

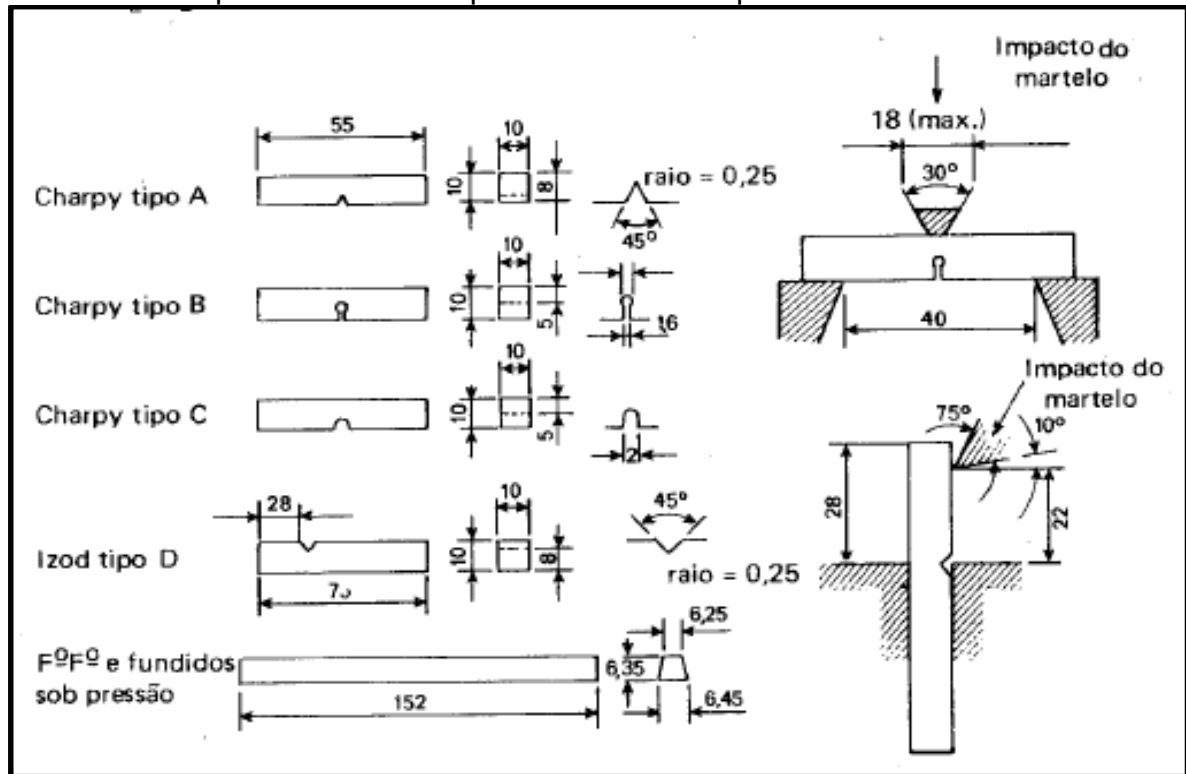
É bastante importante esclarecer que o entalhe produz um estado triplo de tensões, suficiente para provocar uma ruptura de caráter frágil. No entanto, não se pode medir satisfatoriamente os componentes das tensões existentes, pois podem mesmo variar conforme o metal usado ou conforme a estrutura interna a que o metal apresenta. Dessa forma, o ensaio de impacto em corpos de prova entalhados tem

limitada significação e interpretação, sendo útil apenas para comparação de materiais ensaiados nas mesmas condições [27].

Os corpos de prova entalhados para a realização do ensaio de impacto geralmente são de duas classes: corpo de prova Charpy e corpo de prova Izod, e são especificados pela norma americana E-23 da ASTM [28]. Os corpos de prova Charpy ainda podem ser divididos em 3 tipos conforme a forma do seu entalhe. Desta forma temos corpo de provas Charpy tipo A, B e C, todos eles possuindo uma secção quadrada de 10 mm de lado e um comprimento de 55 mm. O entalhe é feito no meio do corpo de prova e no tipo A tem a forma de V, no tipo B, a forma de fechadura e no tipo C, a forma de U invertido. O corpo de prova Izod tem uma secção quadrada de 10 mm de lado com um comprimento de 75 mm e o entalhe é feito a uma distância de 28 mm de uma das extremidades, tendo sempre a forma de V [21,22].

Quando utilizamos os corpos de prova Charpy, os mesmos ficam livremente apoiados na máquina de ensaio respeitando uma distância de 40 mm, já os corpos de prova Izod sempre ficam engastados, com o entalhe na altura da superfície do engaste. A figura 16 mostra os corpos de prova Charpy e Izod conforme a norma ASTM e ABNT.

**Figura 16** – Corpos de prova Charpy e Izod, recomendados pela ASTM e ABNT para ensaio de impacto e local de impacto no martelo.



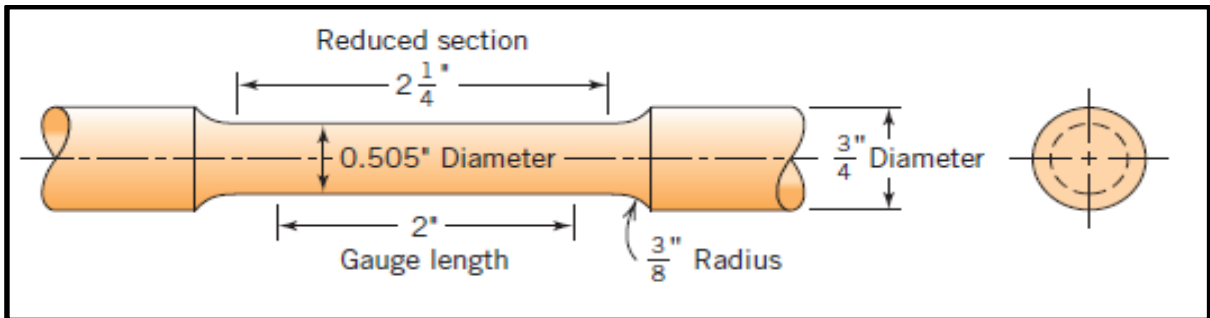
Fonte: [21]

## 2.12. ENSAIO DE TRAÇÃO

Um dos ensaios de tensão-deformação mais comuns é executado sob tração, o ensaio de tração pode ser usado para avaliar diversas propriedades mecânicas dos materiais que são importantes em projetos [6].

A facilidade de execução e a reprodutividade dos resultados obtidos tornam o ensaio de tração o mais importante de todos os ensaios mecânicos. A aplicação de uma força no corpo sólido promove uma deformação do material na direção do esforço e o ensaio de tração consiste em submeter um material a um esforço que tende a alongá-lo. Geralmente, o ensaio é realizado num corpo de prova de formas e dimensões padronizadas, para que os resultados obtidos possam ser comparados ou, se necessário reproduzidos [21]. A norma brasileira da ABNT NBR ISO 6892 descreve a padronização dos corpos de provas para os diferentes tipos de materiais [29]. A figura 17 esquematiza um corpo de prova de tração padrão de seção circular.

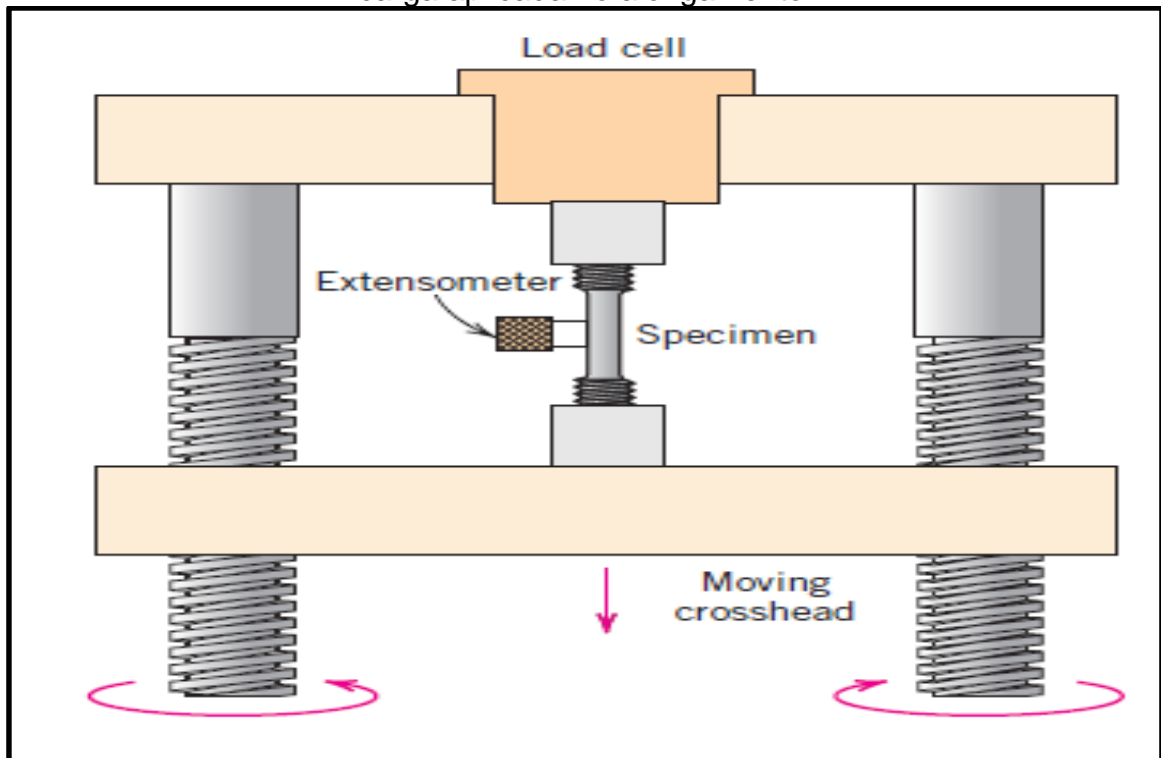
**Figura 17** – Um corpo de prova padrão para ensaio de tração com seção reta circular.



Fonte: [12]

Este corpo de prova é fixado numa máquina de ensaio que aplica esforços crescentes na sua direção axial, sendo medidas as deformações correspondentes por intermédio de um aparelho especial (o mais comum sendo o extensômetro) [21]. A figura 18 representa esquematicamente uma máquina de tração acoplada com um extensômetro.

**Figura 18** – Representação esquemática do dispositivo usado para conduzir ensaios tensão deformação por tração. O corpo de prova é alongado pelo travessão móvel; uma célula de carga e um extensômetro medem, respectivamente, a magnitude da carga aplicada no alongamento.

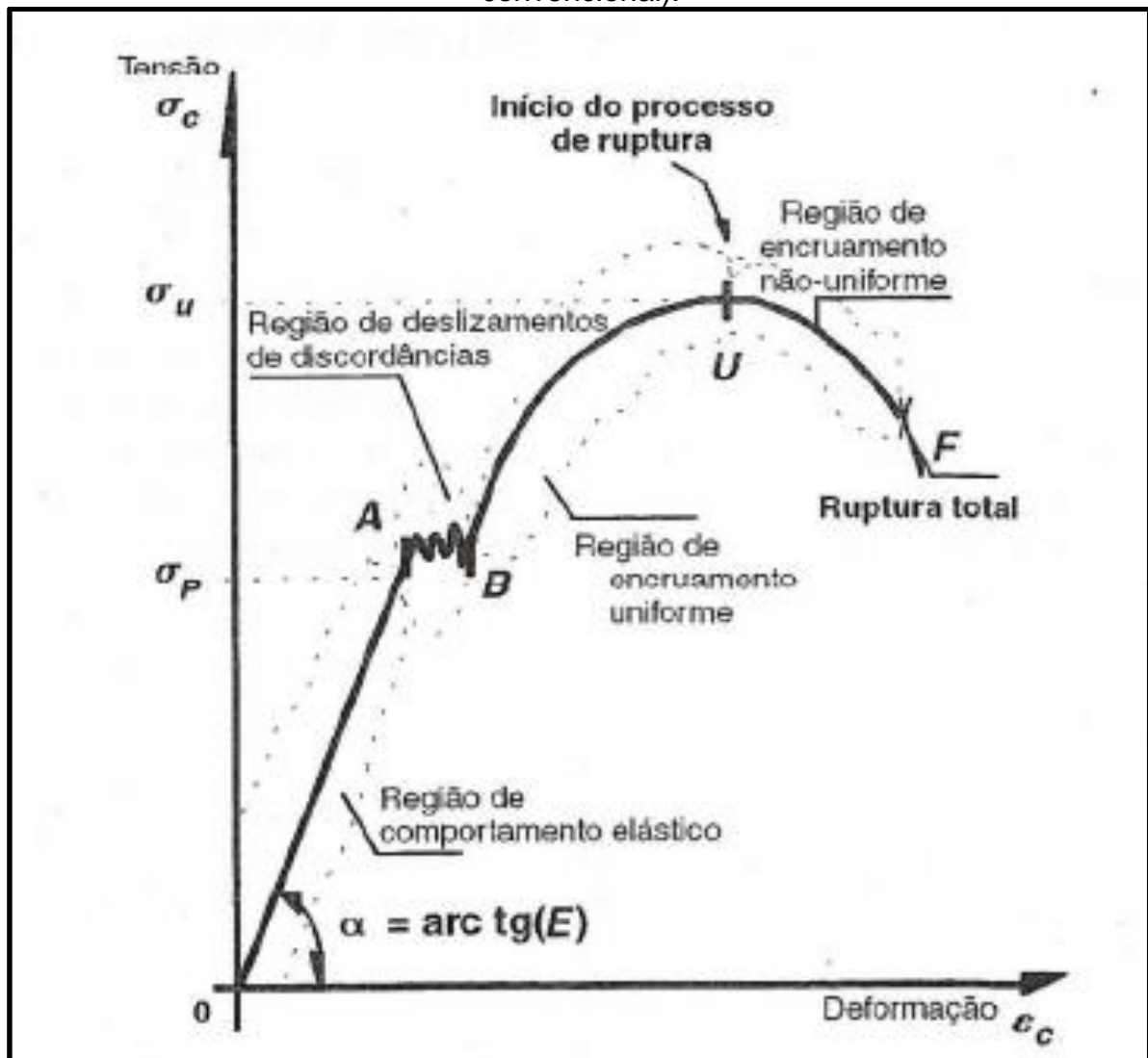


Fonte: [12]

O ensaio de tração revela diversas características importantes do material, dentre as principais temos o limite de resistência a tração, limite de escoamento, modulo de elasticidade, modulo de resiliência, modulo de tenacidade, ductilidade, coeficiente de encruamento, coeficiente de resiliência. A determinação estas propriedades estão descritas na norma brasileira ABNT NBR ISO 6673 [30].

O resultado do ensaio de tração é registrado em um registrador gráfico (ou por um computador), na forma de carga ou força em função do alongamento [6] A conhecida curva tensão-deformação, para cada tipo de material teremos uma curva tensão deformação especifica. A figura 19 mostra um breve esboço de uma curva tensão-deformação.

**Figura 19** – Esboço da curva obtida no ensaio de tração (curva tensão-deformação convencional).



Fonte: [22]



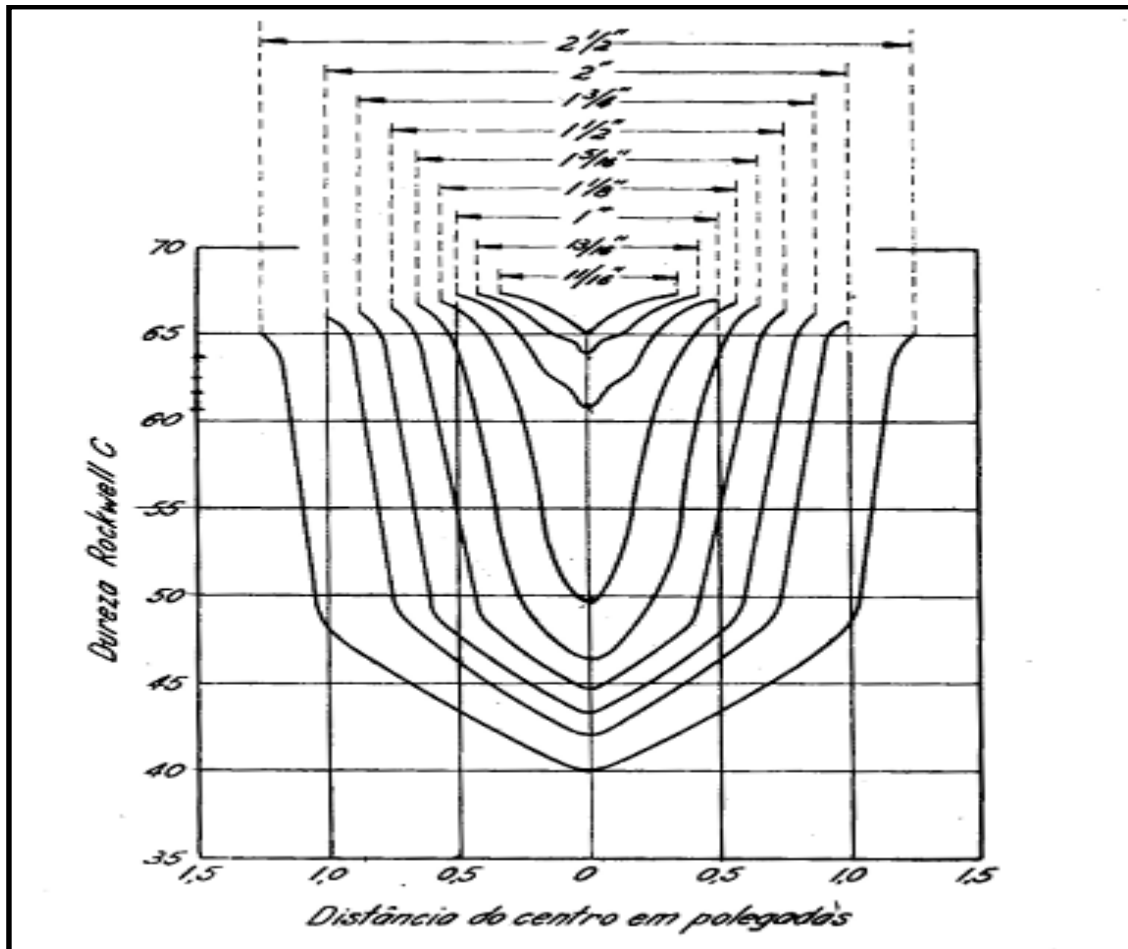
## 2.13. TEMPERABILIDADE DOS AÇOS

A temperabilidade está relacionada à capacidade de endurecimento do aço durante o processo de resfriamento rápido (têmpera), ou seja, sua capacidade de formar martensita a uma determinada profundidade em uma peça. Os métodos mais utilizados para avaliar a temperabilidade são o ensaio Grossmann e o ensaio Jominy [16].

### 2.13.1. Ensaio Grossmann

No ensaio Grossman de determinação da temperabilidade consiste em promover a têmpera de diversos corpos de prova de diâmetro crescente e ao final realizar a determinação da dureza no interior da peça, juntamente com a análise microestrutural. Com os resultados obtidos no ensaio Grossman é possível delimitar o diâmetro crítico ( $D_c$ ), denominando o diâmetro da peça onde o centro possui 50% de martensita, assim qualquer peça com diâmetro maior que  $D_c$  terá valores inferiores de dureza, e para diâmetros menores espera-se a formação plena de estrutura martensítica. No método Grossman quanto maior o  $D_c$  maior é a temperabilidade do material [31]. A figura 20 mostra o resultado gráfico do ensaio de Grossmann para um aço ABNT/SAE 1090.

**Figura 20** – Representação gráfica de um ensaio Grossmann para um aço ABNT/SAE 1090.



Fonte: [31]

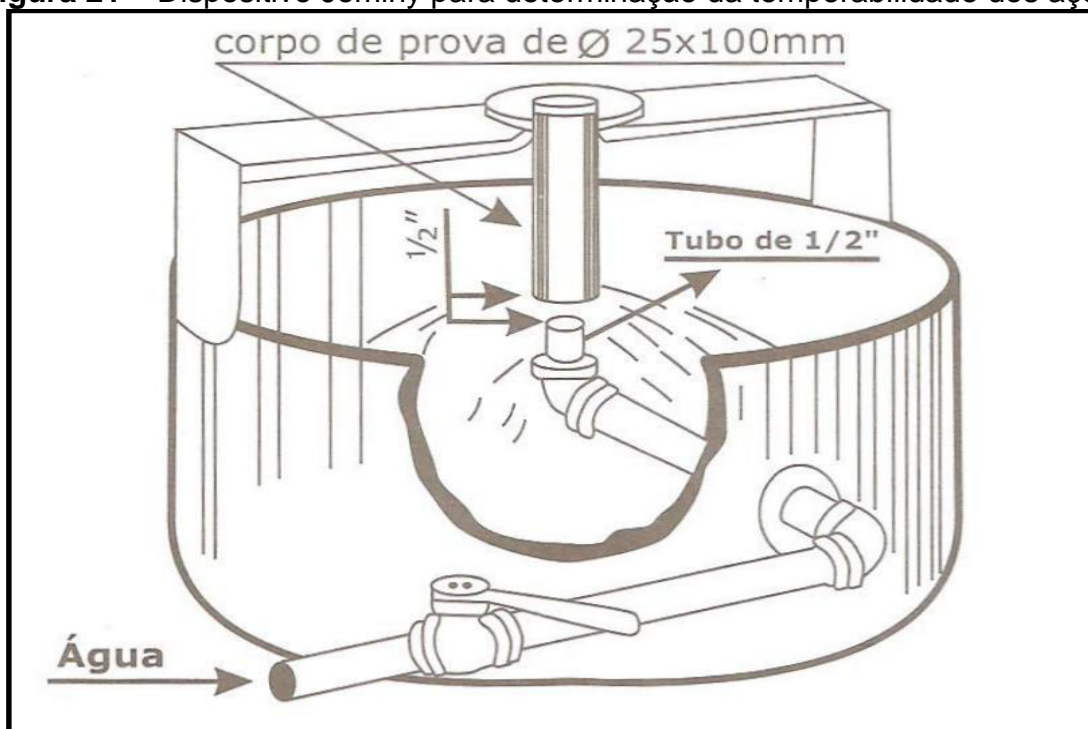
O fato de se necessitar de vários corpos de prova e do tempo demasiado para a realização deste ensaio o deixam bastante desvantajoso, por esse fato utiliza-se na maioria das vezes outro ensaio que apresenta resultados mais rápidos, o ensaio Jominy

### 2.13.2. Ensaio Jominy

O ensaio de Jominy consiste no resfriamento do material em temperatura de austenitização a partir de uma de suas extremidades, motivo pelo qual também é conhecido como ensaio de resfriamento da extremidade, que logo após resfriada e levemente retificada uma trilha longitudinalmente e mede-se a dureza a partir da extremidade resfriada [16,31].

A norma americana ASTM A-255 descreve todas as especificações do corpo de prova e passos para a realização do ensaio [32]. Que consiste simplificada nas seguintes etapas: confecção de um corpo de prova com medidas padrão; aquecimento do corpo de prova até a temperatura de austenitização e permanência nessa temperatura por pelo menos uma hora; retirada do corpo de prova do forno e resfriamento do mesmo a partir da extremidade, por dez minutos, em equipamento apropriado para tal operação [31]. A figura 21 mostra o dispositivo utilizado para a realização do ensaio Jominy.

**Figura 21** – Dispositivo Jominy para determinação da temperabilidade dos aços.



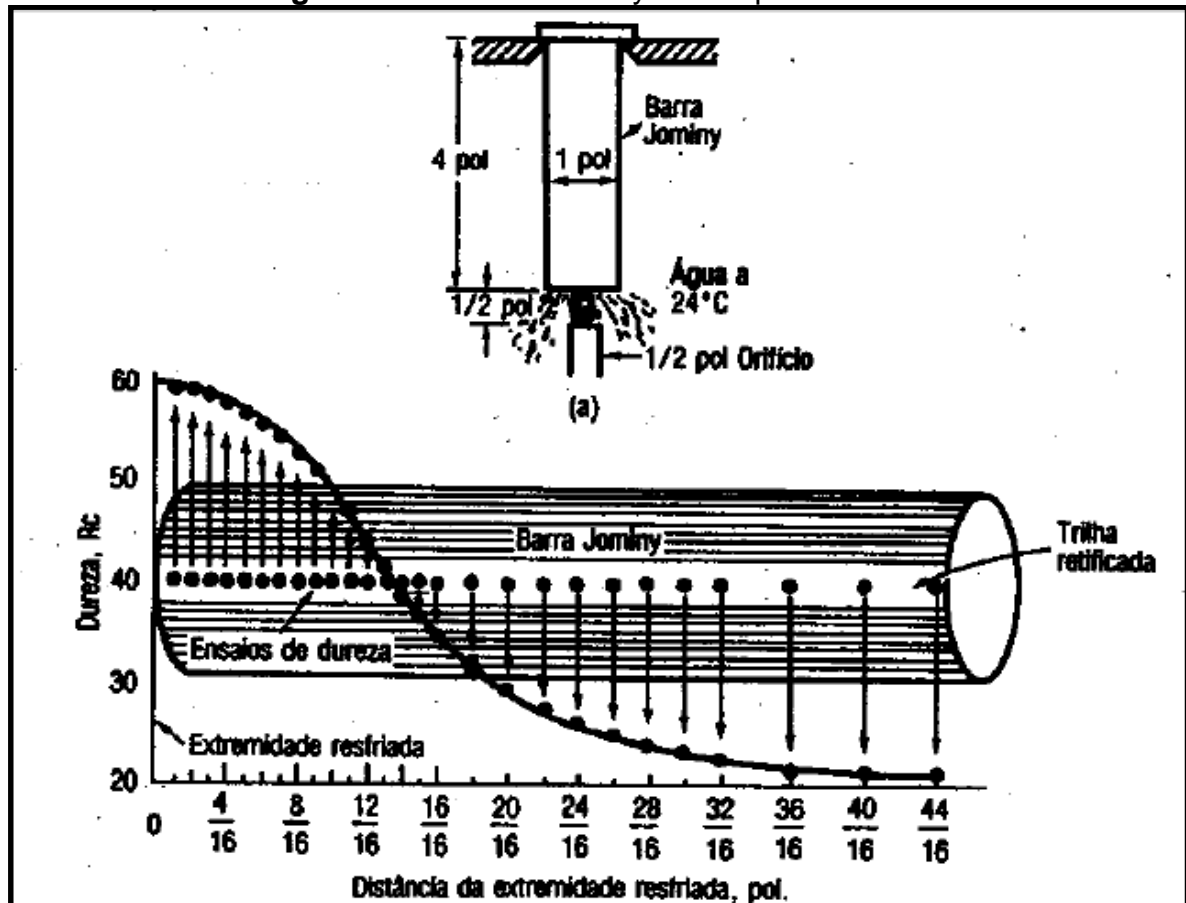
Fonte: [24]

Os resultados são lançados na forma de gráfico onde a abscissa representa a distância da extremidade temperada e a ordenada representa a dureza obtida, que preferencialmente deve estar na escala Rockwell C.

Para o ensaio Jominy considera-se que o material tem boa temperabilidade quando a dureza da peça não sofre grandes decréscimos ao se afastar da extremidade temperada. Como a velocidade de resfriamento na base do corpo de prova é bem maior, e vai diminuindo a medida que a distância dessa base aumenta, pode-se considerar que um aço que mantenha elevada a dureza ao longo de todo o corpo de prova após o ensaio possui facilidade de formação de martensita mesmo a

taxas de resfriamento menores e, portanto, uma alta temperabilidade, caso contrário, com um decréscimo acentuado nos valores de dureza ao longo do corpo de prova este é um indicativo de que o aço tem uma baixa temperabilidade [31]. A figura 22 esquematiza o ensaio Jominy de temperabilidade.

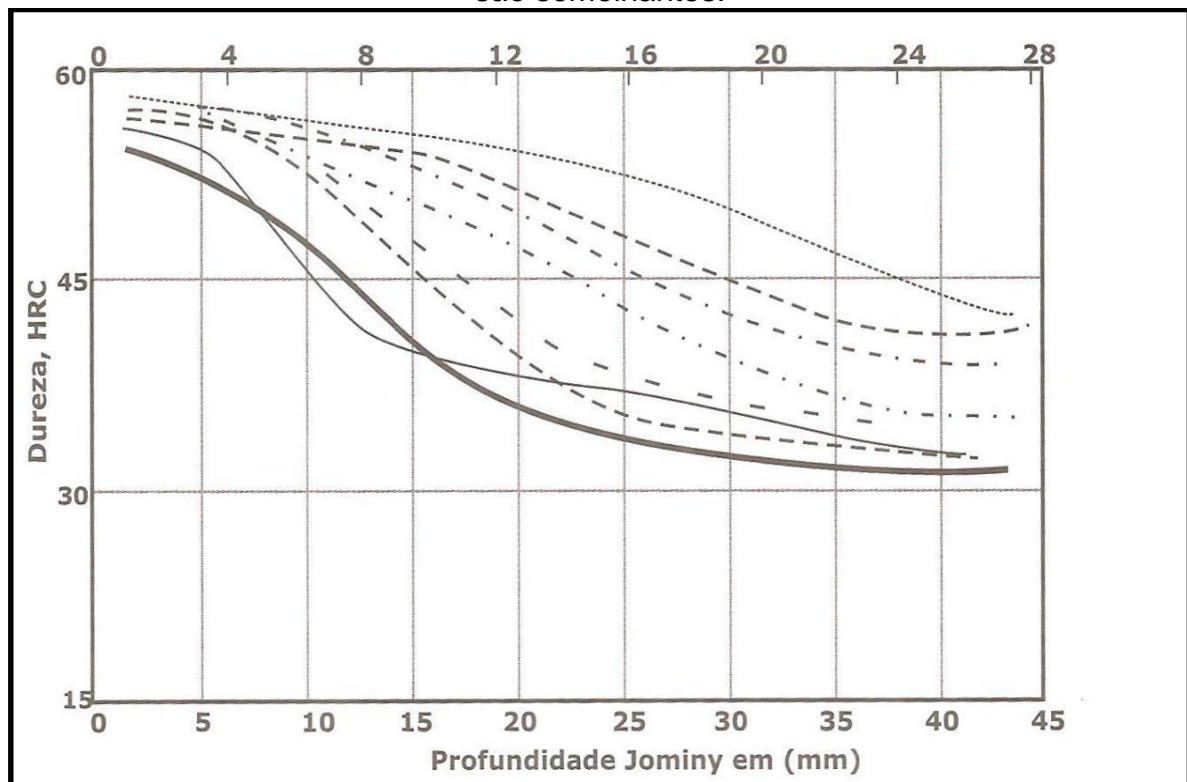
Figura 22 – Ensaio Jominy de temperabilidade.



Fonte: [16]

Se forem feitos vários ensaios Jominy para um determinado tipo de aço, porém com amostras provenientes de diversas fontes, haverá uma dispersão de resultados. Isto ocorre pelo fato da diferença na estrutura dos aços (tamanho de grão, inclusões, etc) e nas composições químicas. Por este fato, as curvas obtidas na literatura apresentam uma faixa de dureza e não uma dureza única [16]. A figura 23 mostra o resultado da curva Jominy obtidos em diferentes laboratórios para o aço ABNT/SAE 4140 explicitando o que foi dito.

**Figura 23** – Resultados da curva Jominy obtidos em diferentes laboratórios para o aço ABNT/SAE 4140. A composição nominal e o tamanho de grão para cada ensaio são semelhantes.



Fonte: [24]

A temperabilidade de um aço carbono também é determinada pelo teor de carbono e dos elementos de liga. Essa determinação é feita por equações que representam um teor de carbono equivalente, calculado a partir dos elementos de liga mais comuns e do teor de carbono chamado de carbono equivalente (CE). A equação mais empregada para a determinação do CE é a desenvolvida pelo Instituto Internacional de Soldagem (IIW), que consta na norma brasileira ABNT NBR 8965.

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (\% \text{ em peso})$$

O carbono equivalente é uma medida que avalia a composição química de uma liga, de acordo com a influência de cada elemento sobre uma característica que se deseja avaliar, tais como, soldabilidade ou temperabilidade [14]. Para  $CE < 0,40$  temos uma boa soldabilidade, para  $0,40 \leq CE \leq 0,60$  temos uma média soldabilidade e para  $CE > 0,60$  temos uma má soldabilidade, um carbono equivalente elevado não é indicador de que o aço não é soldável mas sim de que são necessários cuidados cada vez maiores.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. MATERIAIS

O aço utilizado neste estudo se trata do aço SAE 1644 obtido em forma de tarugo de 4 m por 130 mm x 130 mm, fornecido pela empresa SINOBRAS. O mesmo foi cortado em tamanhos menores para a usinagem dos corpos de provas (figura 25) seguindo as normas e especificações distintas.

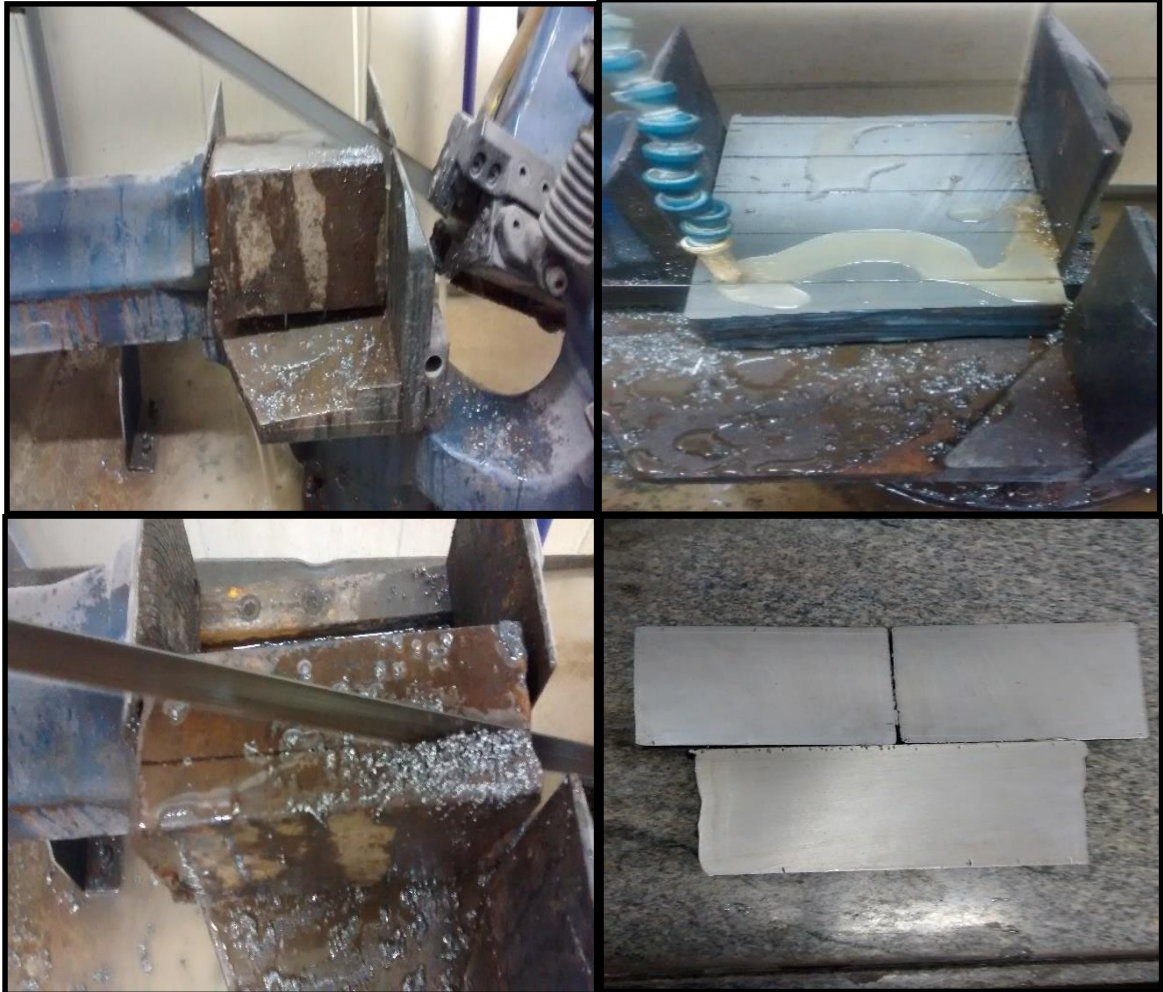
O tarugo foi cortado na máquina de serra fita, Starrett – Modelo ST-3720 - mostrada na figura 24, com potência de 2,3 HP e tensão de 220 V e 60 Hz.

**Figura 24** – Máquina de serra fita utilizada.



Fonte: [Autor]

**Figura 25** – Tarugo sendo cortado em pedaços menores para usinagem dos corpos de provas.



Fonte: [Autor]

### 3.1.1. Análise Química

A análise química das amostras foi realizada em dois espectrômetros de emissão ótica de marcas diferentes; o espectrômetro de emissão ótica. ARL™ 3460 Metals Analyzer da THERMO SCIENTIFIC e o espectrômetro de emissão ótica SPECTROMAX da SPECTRO são mostrados nas figuras 26 e 27 respectivamente.

**Figura 26** - Espectrômetro de Emissão Ótica utilizado na análise química.



Fonte: [Autor]

**Figura 27** - Espectrômetro de Emissão Ótica utilizado na análise química.



Fonte: [Autor]

### 3.1.2. Análise Metalográfica



Para a preparação das amostras e posterior análise metalográfica utilizou-se a cortadora de amostras metalográficas com até 40 mm de diâmetro, AROTEC, modelo COR-40, mostrada na figura 28. Em seguida, para a preparação da estrutura para a análise microscópica e ensaio de dureza, utilizou-se o jogo de lixas d'água de granulometria 80, 100, 220, 320, 400, 600, 800, e 1200 as quais foram utilizadas na lixadeira e politriz AROTEC mostrada na figura 29, modelo AROPOL 2V com duas velocidades fixas, 300 e 600 rpm.

**Figura 28** - Cortadora de amostras metalográficas utilizada.



Fonte: [Autor]

**Figura 29** - Lixadeira e politriz utilizada na preparação das amostras.



Fonte: [Autor]

Para análise microscópica utilizou-se o microscópio ótico Olympus, modelo BX41M, e para análise macroscópica utilizou-se o microscópio estéreo Olympus, modelo SZ61 acoplado de uma unidade de fonte de luz Olympus modelo LG-PS2, mostrados nas figuras 30 e 31 respectivamente.

**Figura 30** - Microscópio ótico utilizado na análise microscópica.



Fonte: [Autor]

**Figura 31** - Microscópio estéreo e unidade de fonte de luz utilizados na análise macroscópica.



Fonte: [Autor]

### 3.1.3. Ensaio de Dureza

Para a realização do ensaio de dureza do aço antes e depois da realização do ensaio Jominy utilizou-se o durômetro de bancada Pantec, com leitura de dureza em todas escalas Rockwell e Rockwell superficial. O durômetro é mostrado na figura 32.

**Figura 32** - Durômetro de bancada utilizado para medida de dureza Rockwell C.



Fonte: [Autor]

### 3.1.4. Ensaio de Impacto

O ensaio de impacto foi realizado na máquina de ensaio de impacto da marca JINAN SHIDAI SHIJIN INSTRUMENT CO. LTD conforme mostrada na figura 33, com escala de 0-300 J (com resolução de 2 J – martelo maior) e 0-150 J (com resolução de 1 J- martelo menor).

**Figura 33** - Máquina de ensaio de impacto utilizada.



Fonte: [Autor]

### 3.1.5. Ensaio de dobramento

Na realização do ensaio de dobramento dos corpos de provas foi utilizada a máquina de dobramento da marca TRILLOR, modelo NEOCOUDE 25 com velocidade do prato de 7,5 rpm. O equipamento citado é mostrado na figura 34.

**Figura 34** - Máquina de ensaio de dobramento utilizada.



Fonte: [Autor]

### 3.1.6. Ensaio de tração

Para realização do ensaio de tração e obtenção do gráfico tensão deformação, utilizou-se a máquina universal de ensaio de tração da marca TINIUS OLSEN, model 602, console 120,000 lbf, conforme mostrada na figura 35.

**Figura 35** - Máquina universal de ensaio de tração utilizada.

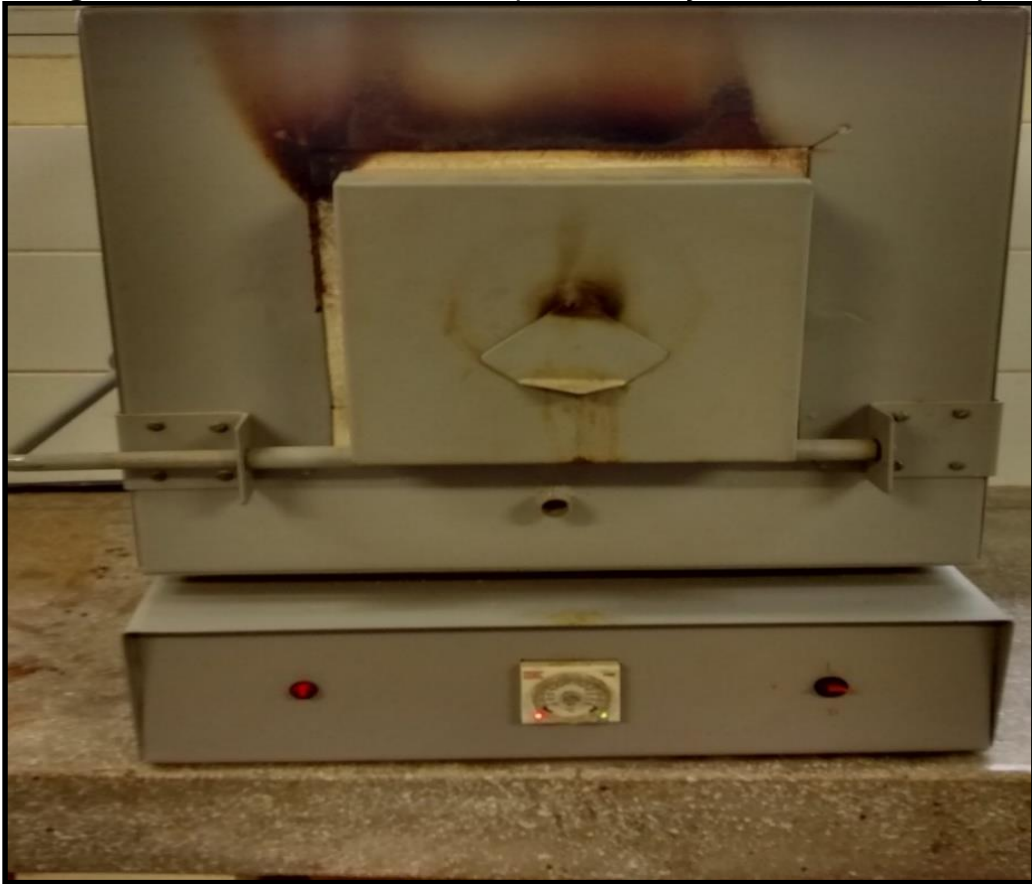


Fonte: [Autor]

### 3.1.7. Ensaio Jominy

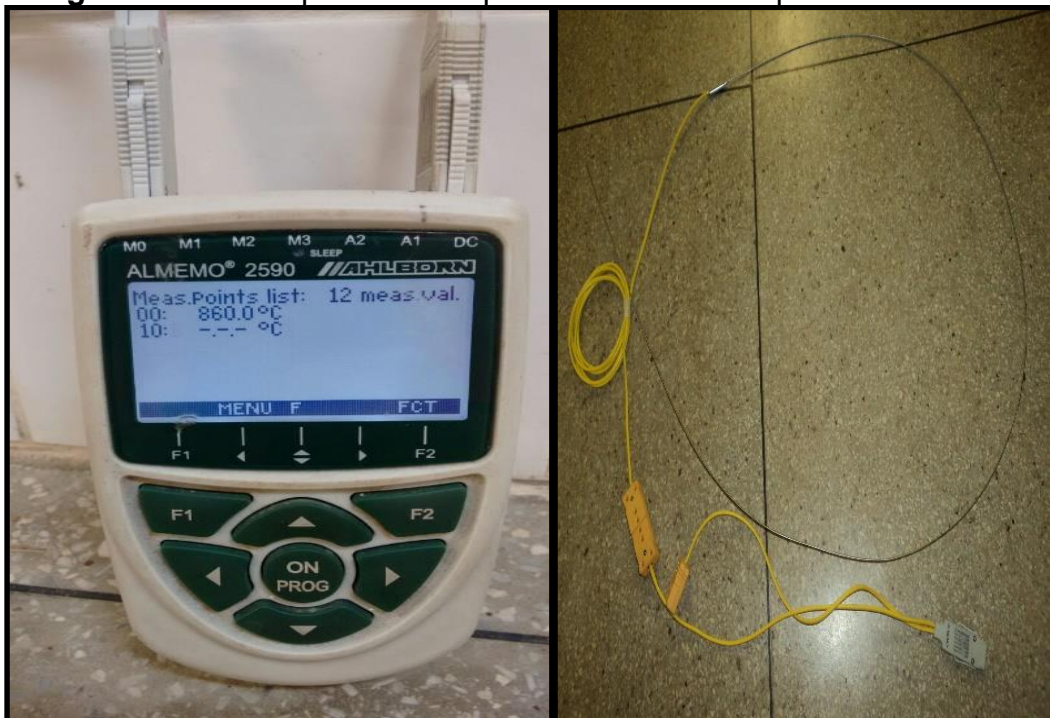
Para o ensaio de Jominy utilizou-se o forno tipo mufla para alcance e mantimento da temperatura (figura 36). Para se ter um controle mais exato da temperatura utilizou-se o termopar da marca ALMEMO® (figura 37) modelo 2590, tipo K, NiCr-Ni com leitura de -200 a +1200 °C além de um termômetro digital infravermelho da marca ICEL (figura38), modelo TD-950 com leitura de -20 a +270 °C e resposta espectral 6-14 µm. Por fim utilizou-se o dispositivo para o ensaio de Jominy seguindo as normas específicas, conforme mostrado na figura 39.

**Figura 36** - Forno mufla utilizado para realização do ensaio Jominy.



Fonte: [Autor]

**Figura 37** - Termopar utilizado para controle de temperatura do forno



Fonte: [Autor]

**Figura 38** - Termômetro digital infravermelho usado de apoio no controle da temperatura do forno.



Fonte: [Autor]

**Figura 39** - Dispositivo Jominy utilizado para realização do ensaio.

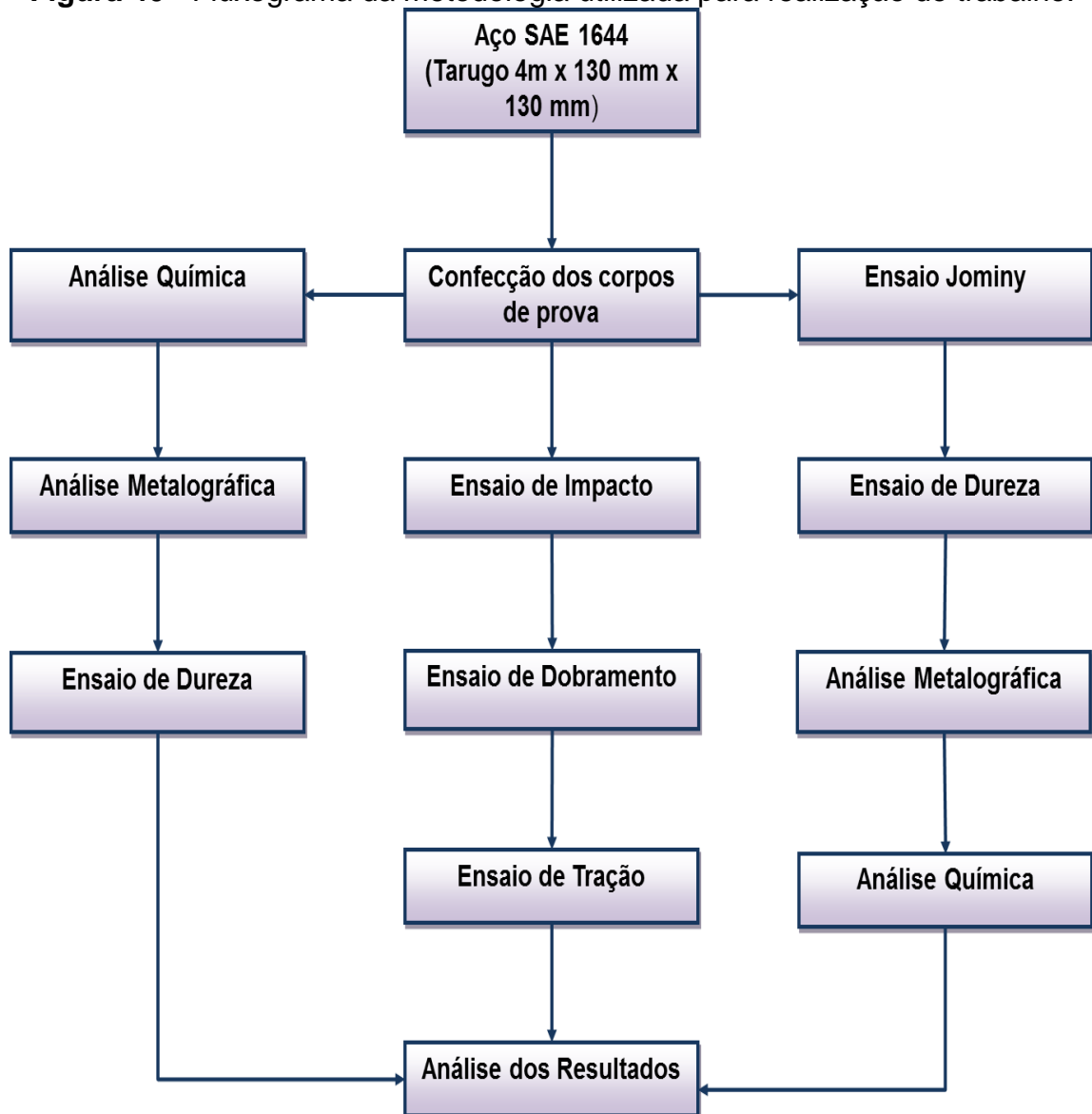


Fonte: [Autor]

### 3.2. MÉTODOS

A figura 40 ilustra o fluxograma geral da metodologia utilizada para a realização deste trabalho.

**Figura 40** - Fluxograma da metodologia utilizada para realização do trabalho.



Fonte: [Autor]

#### 3.2.1. Confecção dos corpos de prova

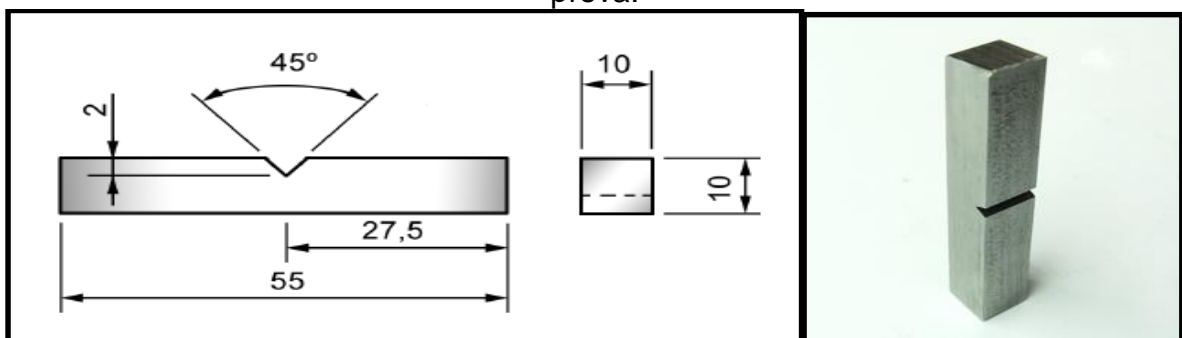
Os corpos de prova foram usinados seguindo as especificações das normas específicas de cada ensaio. A seguir será exposto as dimensões adotadas em cada corpo de prova.



### Ensaio de Impacto

O ensaio de impacto realizado foi o de Charpy, e o corpo de prova escolhido foi o Charpy de tipo A, conforme especificado pela norma americana E-23 da ASTM. Foram usinados 24 corpos de prova que possuíam uma secção quadrada de 10 mm de lado e um comprimento de 55 mm, sendo que o entalhe foi feito no meio do corpo de prova. A figura 41 ilustra as dimensões e formato do corpo de prova e a figura 42 mostra os corpos de prova já usinados.

**Figura 41** - Dimensões do corpo de prova Charpy tipo A e esquema do corpo de prova.



Fonte: [Autor]

**Figura 42** - Corpos de prova de Charpy tipo A, usinados.



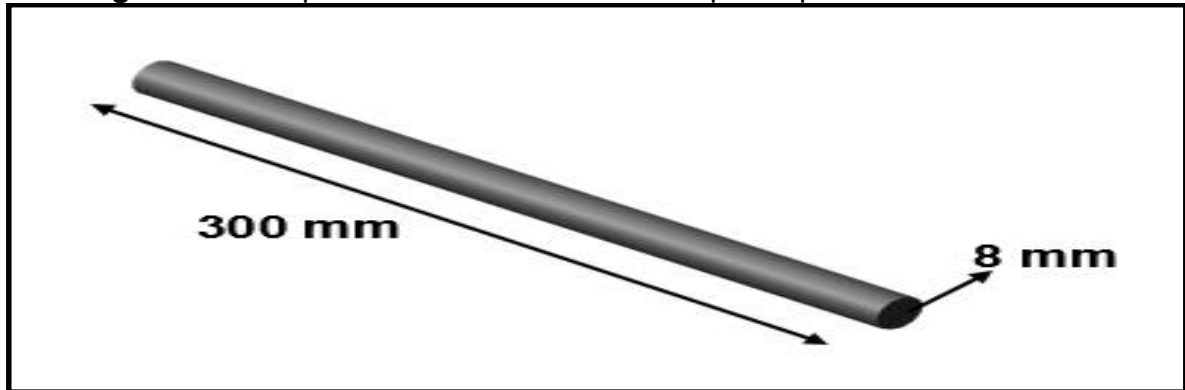
Fonte: [Autor]

### Ensaio de dobramento

Para confecção dos corpos de prova de dobramento utilizou-se a norma ABNT NBR 6153. Foram usinados 5 corpos de prova e adotou-se pelos corpos de prova estilo vergalhões com 300 mm de comprimento por 8 mm de diâmetro. A figura 43

ilustra a dimensão e o formato do corpo de prova de dobramento utilizado e a figura 44 exhibe os corpos de prova já usinados.

**Figura 43** - Esquema das dimensões do corpo de prova de dobramento.



Fonte: [Autor]

**Figura 44** - Corpo de prova de dobramento, usinado.

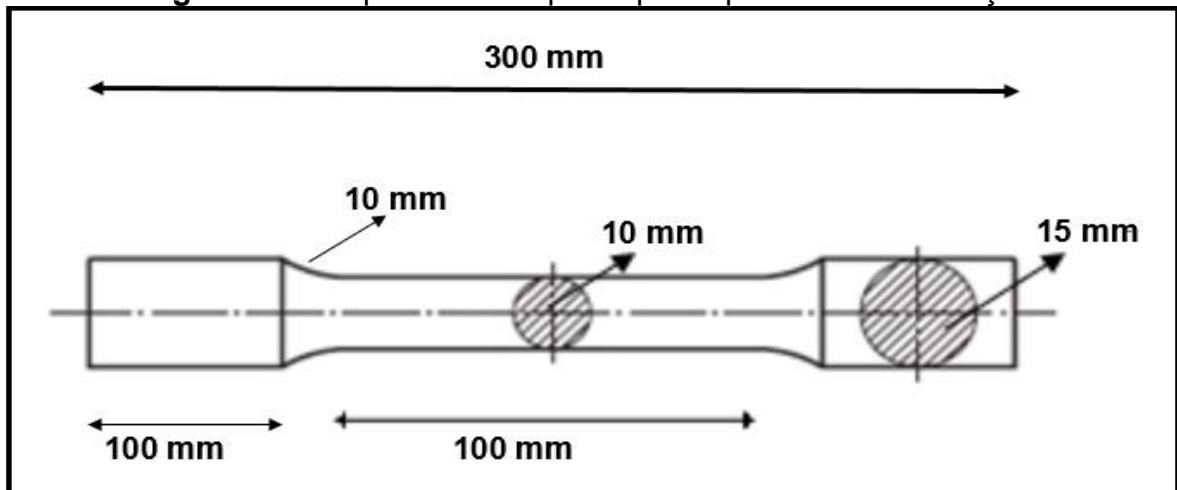


Fonte: [Autor]

### Ensaio de Tração

Para a confecção dos corpos de prova de tração seguiu-se a norma da ABNT NBR ISO 6892, com uma adaptação nas cabeças, para os mordentes da máquina universal de tração utilizada. Foram usinados 10 corpos de prova para a realização do ensaio. A figura 45 mostra o esquema do corpo de prova de tração utilizado e a figura 46 mostra o corpo de prova usinado.

**Figura 45** - Esquema do corpo de prova para ensaio de tração.



Fonte: [Autor]

**Figura 46** - Corpo de prova de tração usinado

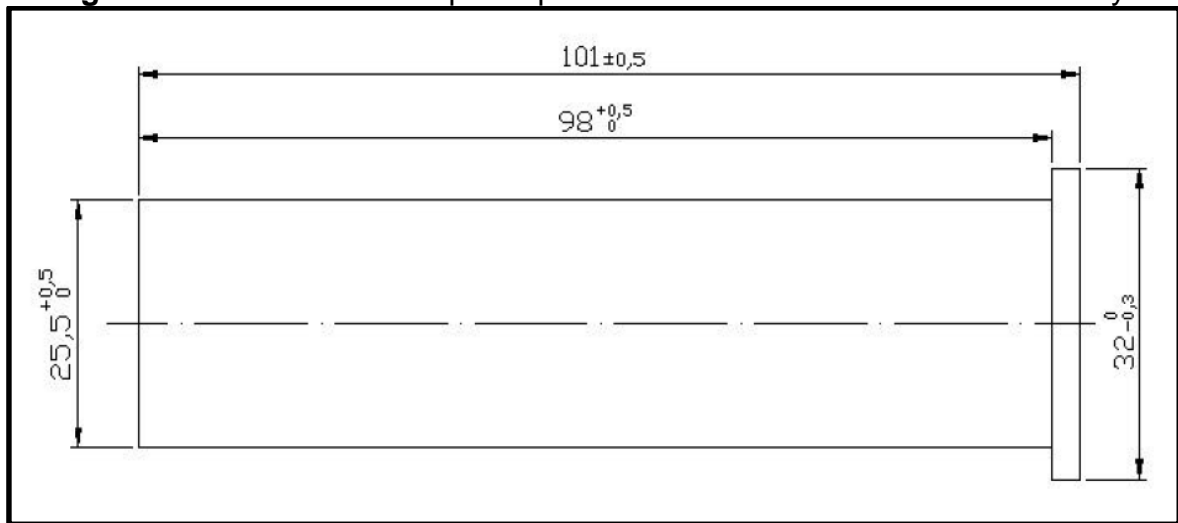


Fonte: [Autor]

### Ensaio Jominy

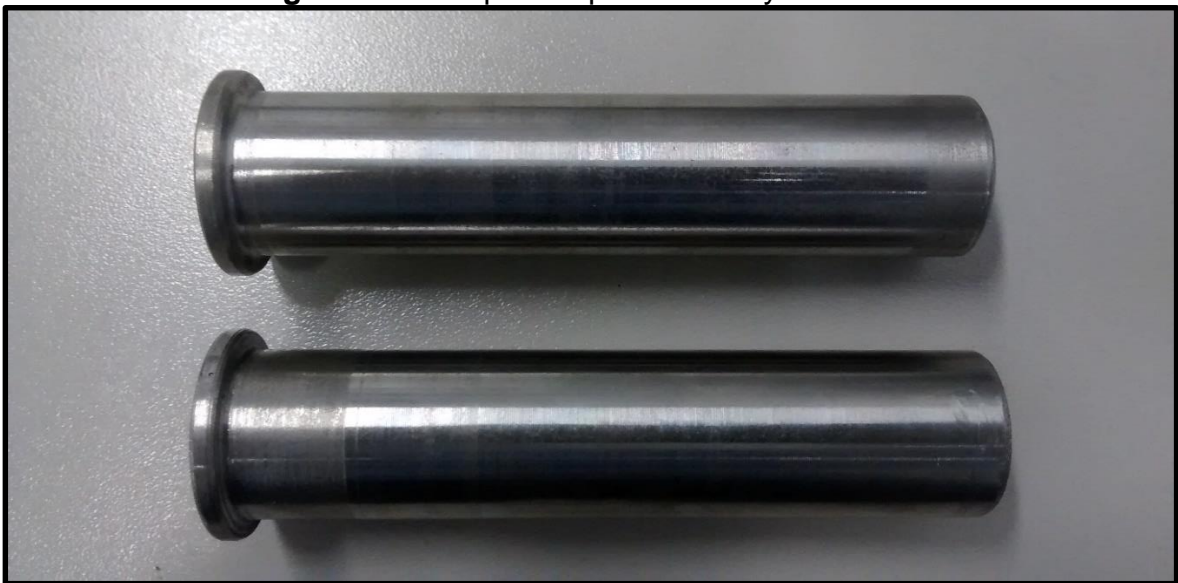
Para confecção dos corpos de prova para realização do ensaio de Jominy utilizou-se a norma americana ASTM A-255. Foram usinados 2 corpos de prova de 101 mm de comprimento com 25,5 de diâmetro e 32 mm de diâmetro na região da cabeça para fixação no dispositivo. A figura 47 mostra o desenho do corpo de prova utilizado e a figura 48 mostra os corpos de prova já usinados.

**Figura 47** - Desenho do corpo de prova a ser utilizado no ensaio de Jominy.



Fonte: [2]

**Figura 48** – Corpos de prova Jominy utilizados.



Fonte: [Autor]

### 3.2.2. Ensaio de Impacto

Para realização do ensaio de impacto seguiu-se todas as exigências da norma internacional ASTM-E23-94 a. Os 24 corpos de prova foram ensaiados a temperatura ambiente e optou-se pela utilização do martelo menor com leitura de 0-150 J (resolução de 1 J).

### **3.2.3. Ensaio de Dobramento**

Na realização do ensaio de dobramento semiguiado seguiu-se todas as exigências da norma brasileira ABNT – NBR 6153. O ângulo de dobramento utilizado foi de 180°, utilizando um cutelo com 3 vezes o diâmetro do corpo de prova

### **3.2.4. Ensaio de Tração**

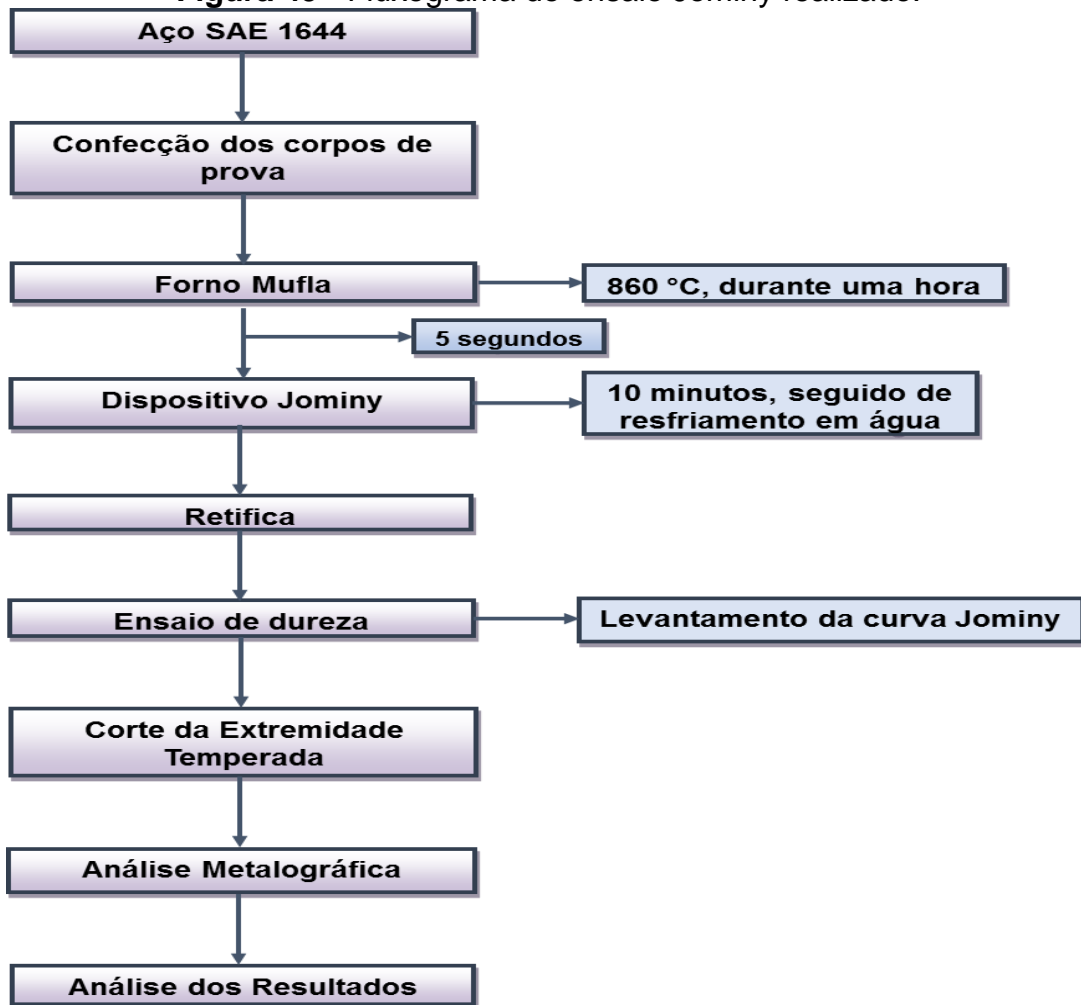
O ensaio de tração realizado seguiu as exigências da norma brasileira ABNT NBR ISO 6892, onde adaptou-se as cabeças dos corpos de prova aos mordentes da máquina universal como descrito e respeitando o comprimento de medida original.

### **3.2.5. Ensaio Jominy**

O fluxograma da metodologia utilizada na realização do ensaio Jominy Para a realização do ensaio de Jominy é mostrada na figura 49.

Seguiu-se todas as exigências da norma internacional ASTM-A255. Os corpos de prova foram aquecidos a 860°C durante uma hora com o objetivo de se alcançar a austenização do aço. Após este tempo retirou-se os CP's do forno imediatamente (5 segundos) e iniciou-se o resfriamento com o jato d'água utilizando o dispositivo Jominy por 10 minutos, e por fim conclui-se com resfriamento em água. A figura 50 mostra o momento da retirada dos CP's do forno e o corpo de prova sendo ensaiado.

**Figura 49** - Fluxograma do ensaio Jominy realizado.



Fonte: [Autor]

**Figura 50** – CP's no forno mufla e CP's sendo ensaiados.



Fonte: [Autor]

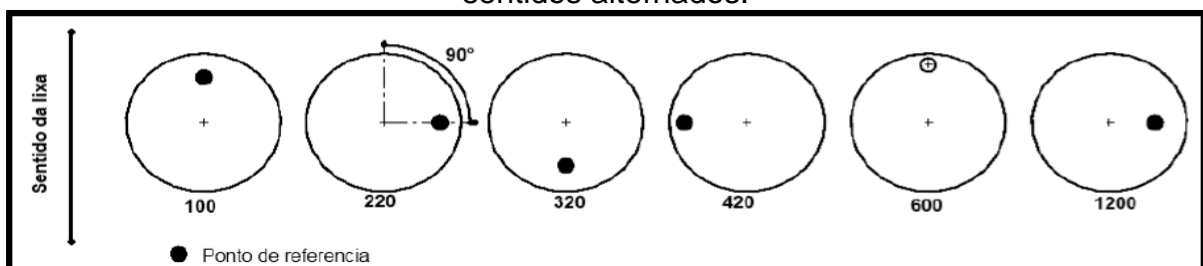
Para a medição dos níveis de dureza, as amostras tiveram os planos necessários retificados com profundidades entre 0,5 e 0,9mm, através da operação de retifica e então foram realizadas medições de dureza Rockwell para distâncias de até 50 mm ao longo do plano retificado, longitudinalmente, a partir da extremidade resfriada pelo jato de água; para os primeiros 12,8 mm, as leituras de dureza são feitas no intervalo de 1/16" (1,6 mm) e para os restantes 38,4 mm todas a 1/8" (3,2 mm).

Tomaram-se alguns cuidados para o êxito do tratamento térmico, os quais foram: o controle do período de tempo entre a retirada do corpo de prova do forno e início da têmpera pela água que deve ser no máximo de 5 segundos; verificação se o dispositivo de têmpera estava seco; o acionamento do dispositivo de abertura rápida da água; dando início a têmpera, evitou-se a agitação do ar ambiente em torno do corpo de prova; controlou-se a água aplicada à superfície de têmpera, e que a mesma fluísse durante no mínimo 10 minutos, e ao final o CP foi mergulhado em água até atingir a temperatura ambiente. Também poderia optar-se pelo resfriamento ao ar. Por fim realizou-se uma análise metalográfica da superfície do corpo de prova.

### 3.2.6. Análise Metalográfica

Para a preparação das amostras para análise metalográfica, é necessário a obtenção de uma superfície plana e isenta de riscos. Para isso utilizou-se o processo de lixamento, onde lixou-se as amostras sucessivamente com lixas de granulometria cada vez maior. As lixas utilizadas foram lixas d'água de 80, 100, 220, 320, 400, 600, 800, e 1200, onde em cada mudança de lixa mudava-se também a direção de lixamento em 90°, só ocorrendo a mudança de uma lixa para outra quando desaparecesse o risco da lixa anterior, conforme esquematizado na figura 51.

**Figura 51** - Representação esquemática do método de lixamento com trabalho em sentidos alternados.



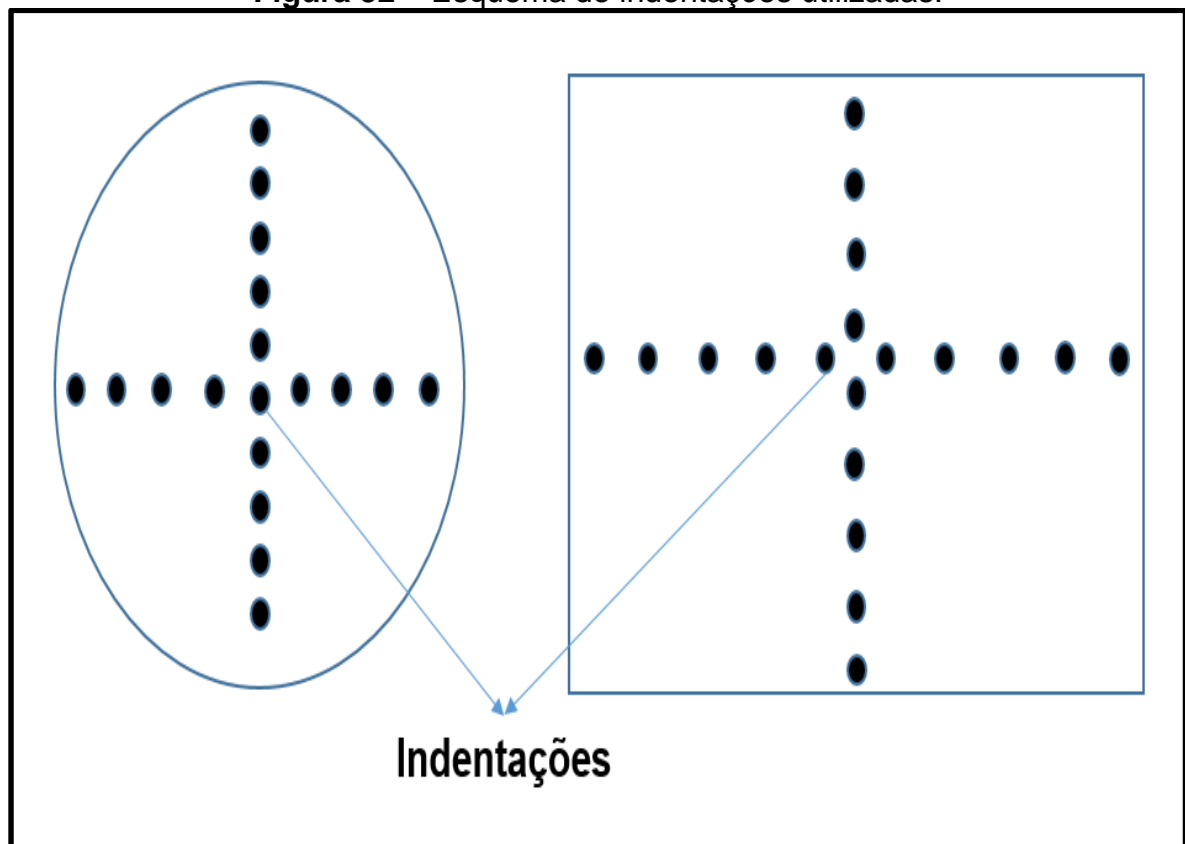
Fonte: [13]

Após o lixamento as amostras foram polidas com alumina a  $0,3\ \mu\text{m}$  até que adquirissem uma superfície espelhada, e atacadas com picral 4% por 5 segundos. As amostras foram observadas no microscópio nas lentes de 100x, 200x, 500x e 1000x, as fraturas e indentações de dureza foram observadas pelo microscópio estéreo de 15 x.

### 3.2.7. Ensaio de dureza

Para a realização do ensaio de dureza foi cortada uma amostra de 2 mm x 2,5 mm, a qual foi lixada para retirada de planos e riscos em lixas d'água de 100, 220, 320, 400 e 600. Logo após foi realizado o ensaio na direção transversal para coleta e elaboração da média estatística. A figura 52 esquematiza como foram realizadas as indentações na região transversal do corpo de prova para coleta de dados e a figura 53 mostra a amostra, logo após a realização do ensaio de dureza.

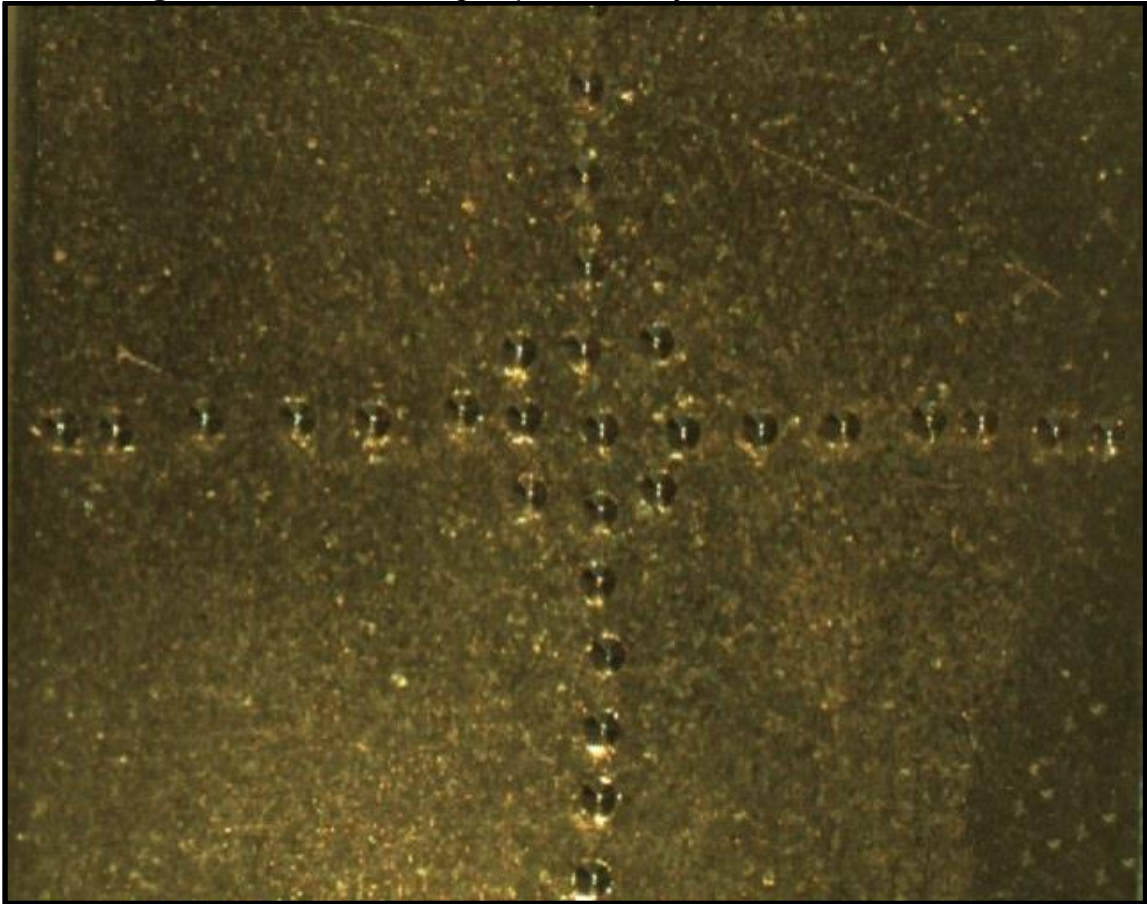
**Figura 52** – Esquema de indentações utilizadas.



Fonte: [Autor]



**Figura 53** – Amostra logo após realização do ensaio de dureza.



Fonte: [Autor]

### 3.2.8. Análise química

Para realização da análise química foi cortada uma amostra de 2 mm x 2,5 mm, a qual foi lixada nas lixas de granulometria 40, 60 e 100 e tomou-se o cuidado para não realizar as queimas acima de queimas anteriores para evitar erros de leitura de alguns elementos como o carbono.

Para determinação do carbono equivalente utilizou-se a equação descrita na norma brasileira ABNT NBR 8965.

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \text{ (\% em peso)}$$

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. ANÁLISE QUÍMICA

As análises químicas realizadas pelos dois espectrômetros de emissão ótica são mostradas nas tabelas 7 e 8.

**Tabela 7** - Análise química do aço SAE 1644 realizada por espectrometria de emissão ótica (THERMO).

Análise Química							
N°	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	0,444	0,170	0,909	0,019	0,009	0,093	0,014
2	0,453	0,168	0,901	0,017	0,008	0,092	0,014
3	0,448	0,164	0,899	0,017	0,010	0,091	0,013
4	0,458	0,325	1,195	0,020	0,019	0,094	0,014
<b>MÉDIA</b>	<b>0,451</b>	<b>0,207</b>	<b>0,976</b>	<b>0,018</b>	<b>0,011</b>	<b>0,093</b>	<b>0,014</b>
<b>DS</b>	<b>0,006</b>	<b>0,079</b>	<b>0,146</b>	<b>0,002</b>	<b>0,005</b>	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>
Ni	V	Cu	Nb	Sn	N	Mn/S	Mn/Si
0,062	0,033	0,215	0,001	0,015	0,010	97,742	5,347
0,062	0,034	0,215	0,001	0,014	0,012	109,878	5,363
0,061	0,035	0,211	0,001	0,015	0,010	94,632	5,482
0,062	0,033	0,214	0,001	0,016	0,011	63,564	3,677
<b>0,062</b>	<b>0,034</b>	<b>0,214</b>	<b>0,001</b>	<b>0,015</b>	<b>0,011</b>	<b>91,454</b>	<b>4,967</b>
<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	<b>0,002</b>	<b>0,000</b>	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	<b>19,723</b>	<b>0,862</b>

Fonte: [Autor]

**Tabela 8** - Análise química do aço SAE 1644 realizada por espectrometria de emissão ótica (SPECTRO).

Análise Química							
N°	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	0,444	0,170	0,950	0,017	0,010	0,090	0,014
2	0,442	0,171	0,960	0,017	0,008	0,091	0,014
3	0,448	0,169	0,969	0,017	0,010	0,090	0,014
4	0,444	0,175	0,969	0,018	0,010	0,091	0,014
<b>MÉDIA</b>	<b>0,445</b>	<b>0,171</b>	<b>0,962</b>	<b>0,017</b>	<b>0,010</b>	<b>0,091</b>	<b>0,014</b>
<b>DS</b>	<b>0,003</b>	<b>0,003</b>	<b>0,009</b>	<b>0,000</b>	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	<b>0,000</b>
Ni	V	Cu	Nb	Sn	N	Mn/S	Mn/Si
0,062	0,035	0,211	0,001	0,014	0,010	118,750	5,588
0,062	0,033	0,210	0,001	0,014	0,010	117,073	5,614
0,062	0,035	0,211	0,001	0,014	0,010	102,000	5,734
0,062	0,035	0,210	0,001	0,014	0,010	96,900	5,537
<b>0,062</b>	<b>0,035</b>	<b>0,211</b>	<b>0,001</b>	<b>0,014</b>	<b>0,010</b>	<b>108,681</b>	<b>5,618</b>
<b>0,000</b>	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>10,882</b>	<b>0,083</b>

Fonte: [Autor]

As análises químicas mostram que o aço se enquadra na classificação estabelecida em norma, com todos elementos dentro das faixas específicas.

O carbono equivalente do aço SAE 1644 foi calculado utilizando a norma ABNT NBR 8965. Utilizando o valor obtido na análise química temos que o CE do aço SAE 1644 é de 0,660. Este valor revela a alta temperabilidade deste aço e sua má soldabilidade, desta forma este aço precisa de cuidados elevados no processo de soldagem visto que apresenta em sua microestrutura adição de vanádio.

#### 4.2. ENSAIO DE DUREZA

A tabela 9 mostra a dureza do aço obtida pelo ensaio de dureza na seção transversal do aço, a qual apresentou uma média de dureza de 22,25 HRC. Este valor de dureza já pode ser enquadrado para aços de alta dureza, pelo fato dessa escala ser utilizada para estes tipos de aços, evidenciando a alta porcentagem de carbono presente no aço.

**Tabela 9 - Dureza obtida nos corpos de prova.**

<b>Dureza aço SAE 1644</b>		
<b>Resultados (HRC)</b>	<b>1°</b>	21,80
	<b>2°</b>	21,60
	<b>3°</b>	19,30
	<b>4°</b>	19,60
	<b>5°</b>	23,10
	<b>6°</b>	22,40
	<b>7°</b>	21,40
	<b>8°</b>	23,10
	<b>9°</b>	23,20
	<b>10°</b>	25,50
	<b>11°</b>	25,20
	<b>12°</b>	21,60
	<b>13°</b>	21,20
	<b>14°</b>	20,80
	<b>15°</b>	22,50
	<b>16°</b>	23,20
	<b>17°</b>	21,40
	<b>18°</b>	21,80
	<b>19°</b>	25,20
	<b>20°</b>	21,00
	<b>Média</b>	<b>22,25</b>
	<b>Desvio Padrão</b>	<b>1,69</b>

Fonte: [Autor]

#### 4.3. ENSAIO DE IMPACTO

Os resultados obtidos no ensaio de impacto são mostrados na tabela 10. O aço apresentou uma baixa absorção de energia de 6,63 J, esta energia obtida revela o comportamento bastante frágil deste aço.

**Tabela 10** - Energia absorvida no ensaio de impacto.

<b>ENSAIO DE IMPACTO TIPO CHARPY</b>		
<b>RESULTADOS</b>	<b>CP</b>	<b>ENERGIA ABSORVIDA (J)</b>
	1	8,0
	2	7,0
	3	7,0
	4	9,0
	5	5,0
	6	7,0
	7	7,0
	8	5,0
	9	5,0
	10	7,0
	11	5,0
	12	8,0
	13	6,0
	14	6,0
	15	6,0
	16	5,0
	17	9,0
	18	5,0
	19	8,0
	20	5,0
	21	7,0
	22	7,0
	23	8,0
	24	7,0
<b>MÉDIA</b>	<b>6,63</b>	
<b>DESVIO PADRÃO</b>	<b>1,31</b>	

Fonte: [Autor]

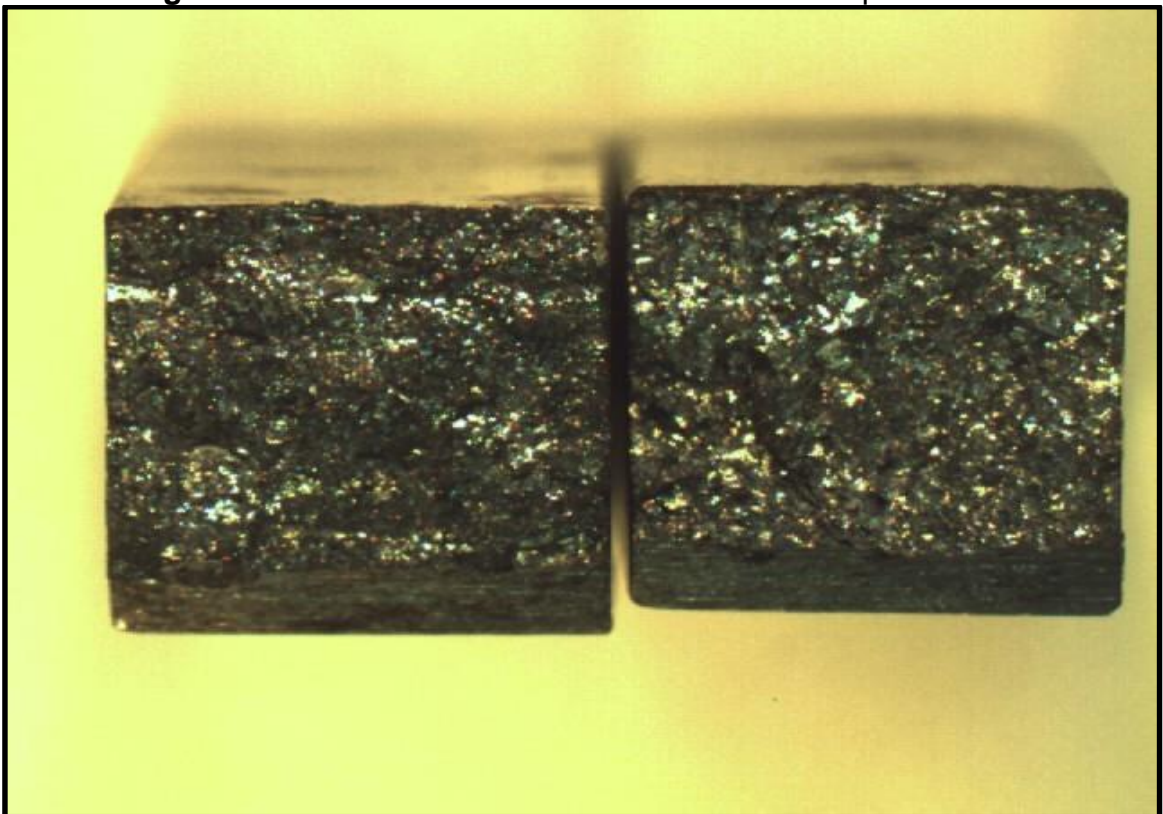
A figura 54 mostra a fratura frágil observada após o ensaio de impacto. A figura 55 foi obtida através do microscópio estéreo, pode-se perceber que o aço possui grãos bastante grosseiros o que contribui ainda mais para este tipo de fratura. A fratura observada é nitidamente uma fratura por clivagem produzindo uma estrutura plana e brilhante, que é característica de metais que apresentam algum impedimento para o escorregamento de discordâncias.

**Figura 54** - Fratura observada nos CP's após ensaio de impacto de Charpy.



Fonte: [Autor]

**Figura 55** - Fratura observada através do microscópio estéreo.



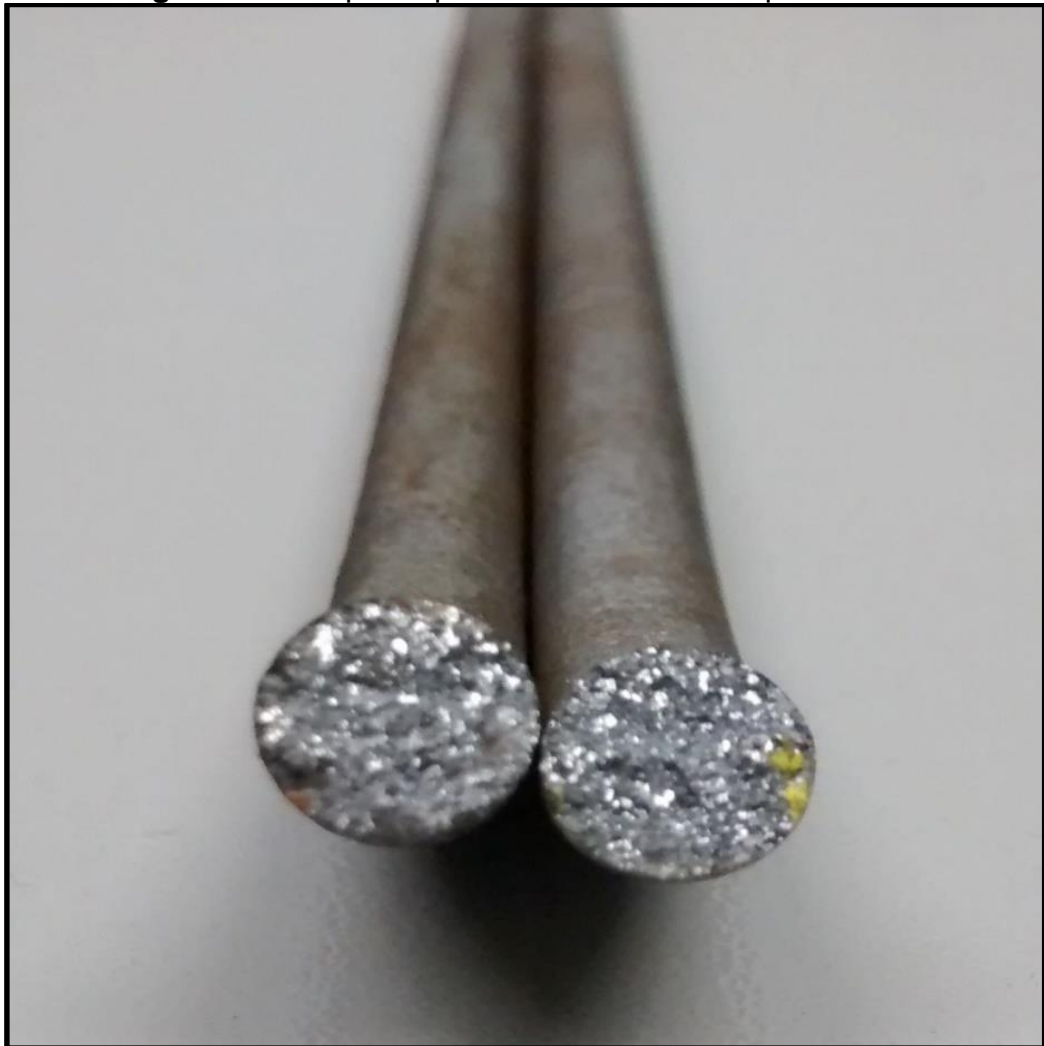
Fonte: [Autor]

#### 4.4. ENSAIO DE DOBRAMENTO

A figura 56 apresenta o resultado do ensaio de dobramento a 180° realizados nos CP's. Os 5 corpos de prova sofreram fratura logo após o início do ensaio, com ângulo de dobramento menores que 45°, evidenciando a baixa ductilidade do material.

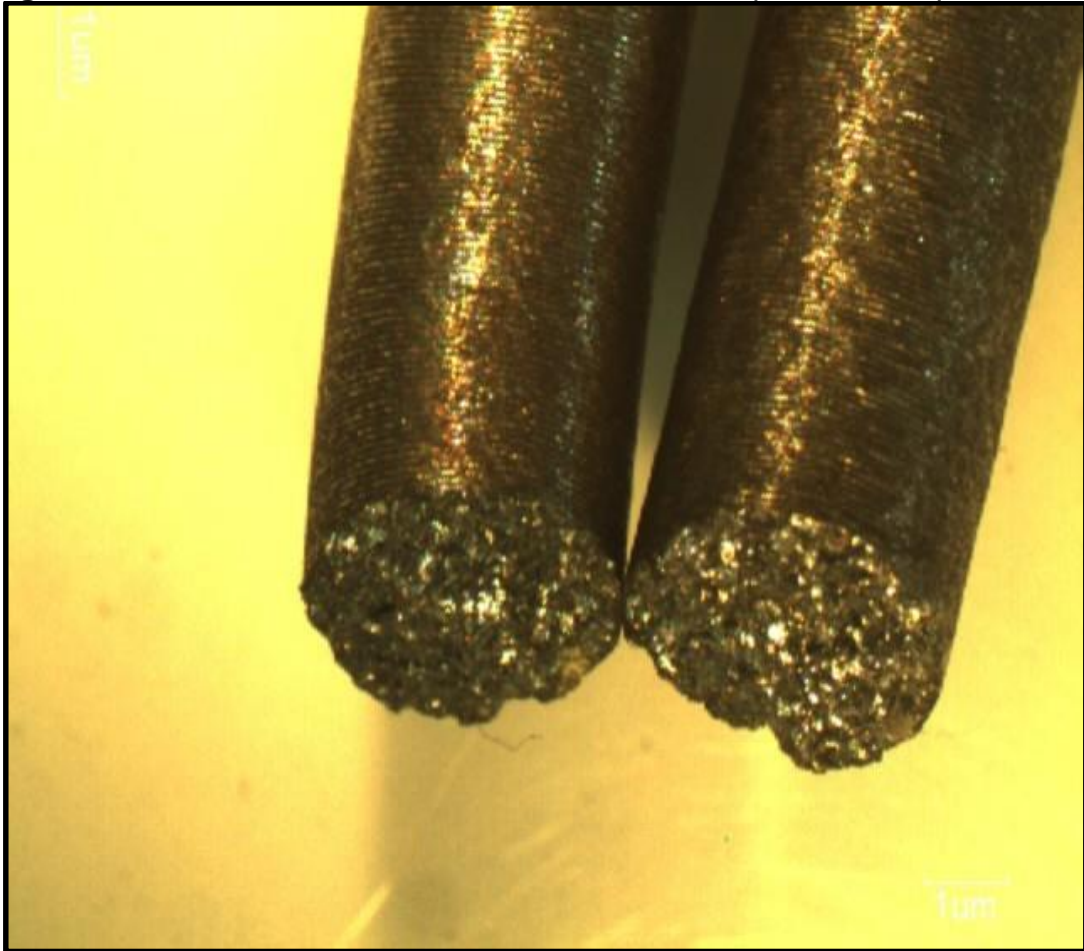
Em algumas regiões tracionadas houve fissuras e quebras no material. Novamente percebe-se a característica da fratura frágil por clivagem presente neste tipo de aço. A figura 57 mostra a superfície fraturada vista de um microscópio estéreo. Novamente temos claramente a visualização da fratura frágil por clivagem. Em todo este tipo de fratura a superfície apresenta este brilho exibido.

**Figura 56** - Corpo de prova de dobramento após ensaio.



Fonte: [Autor]

**Figura 57** - Fratura do CP de dobramento observada por microscópio estéreo.

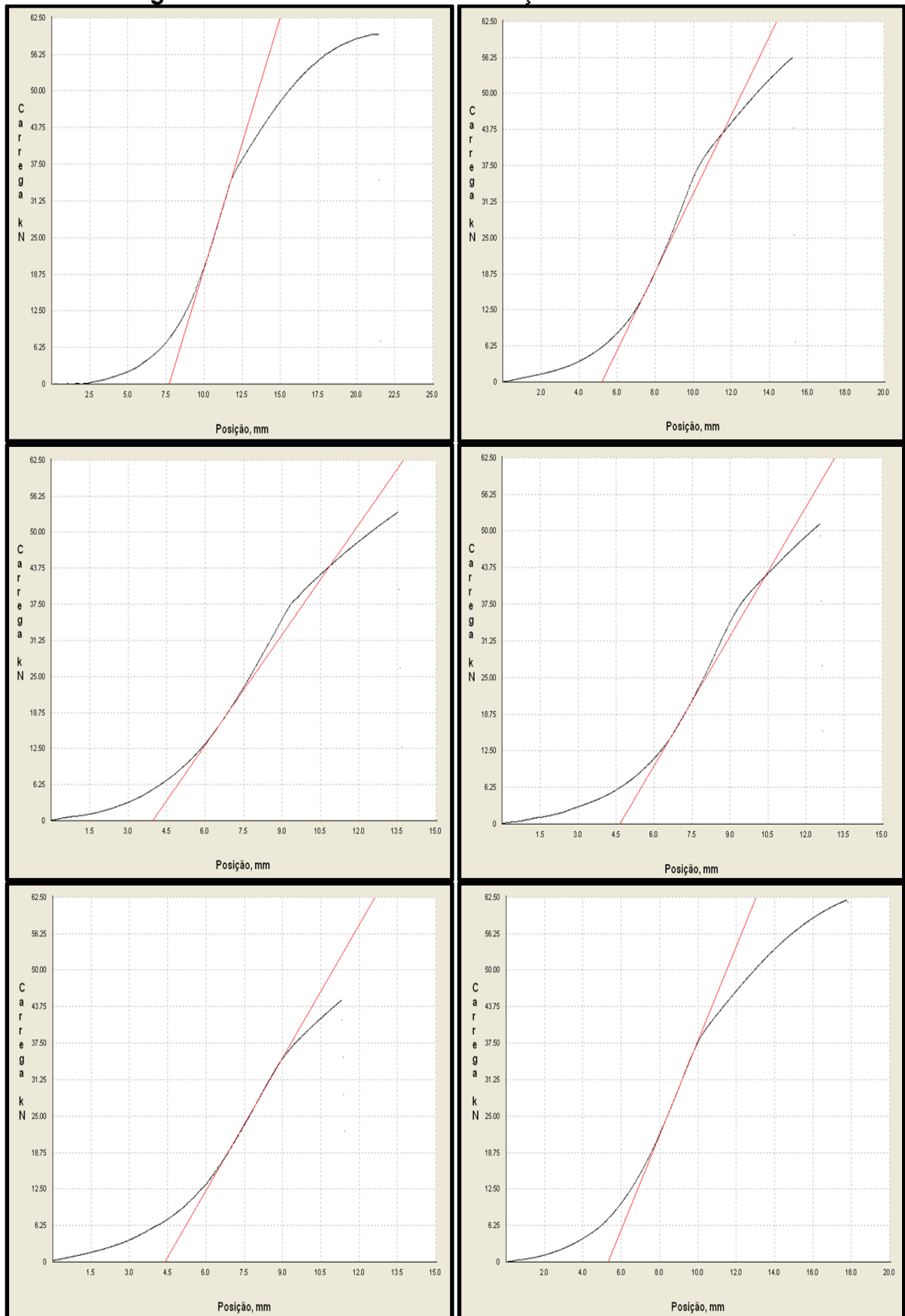


**Fonte:** [Autor]

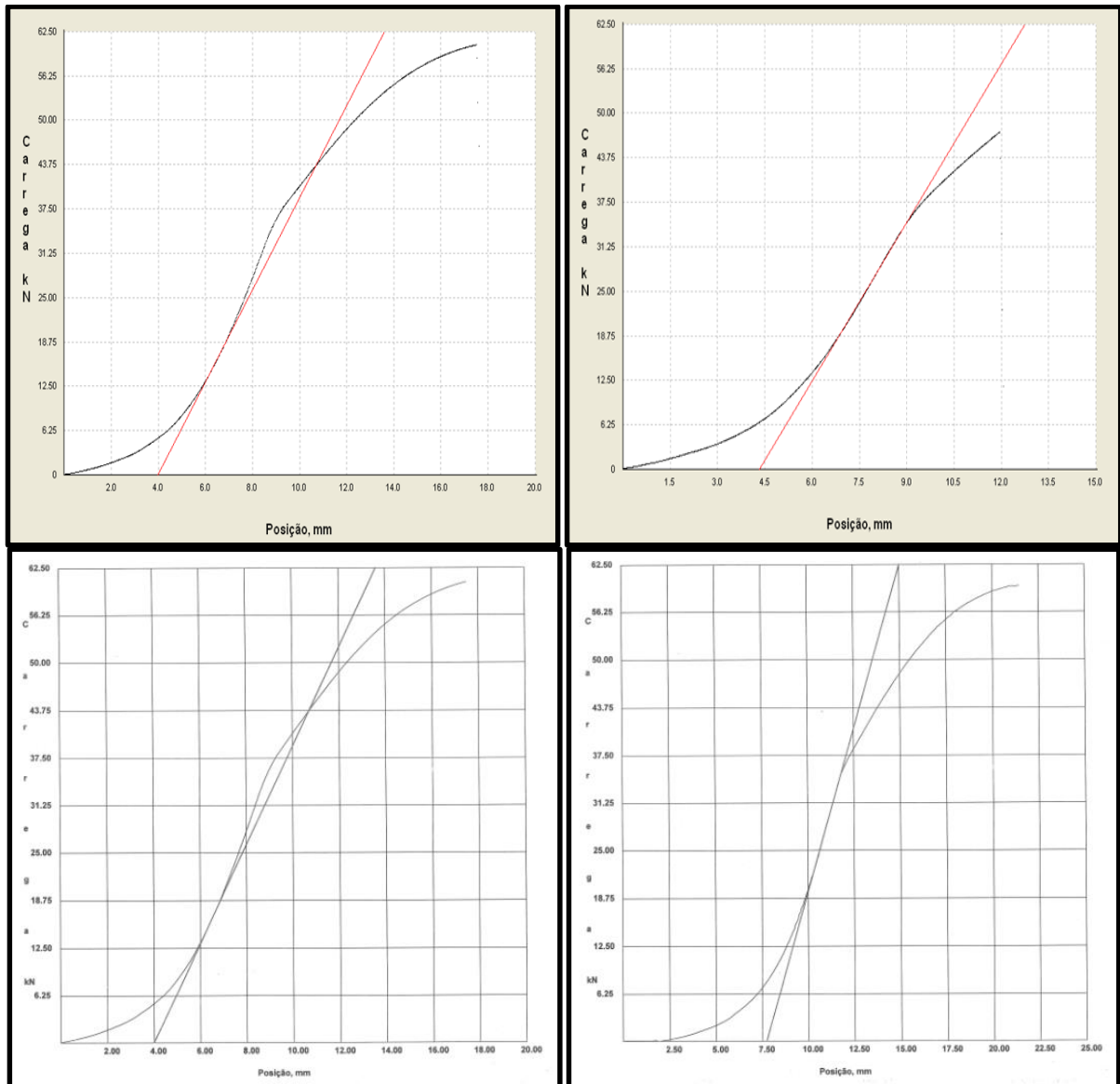
#### 4.5. ENSAIO DE TRAÇÃO

A figura 58 apresenta todos os gráficos tensão x deformação obtidos nos CP's ensaiados. Pode-se perceber a inexistência da zona de escoamento nos gráficos. Isto se deve novamente ao fato da estrutura grosseira presente no aço, e pelo mesmo não ter passado por nenhum processo de refino de grãos, como a laminação. Desta forma traça-se uma linha paralela convencional de 0,2% o que corresponde a uma deformação plástica de 0,002 por unidade de comprimento, assim obtemos na interseção das duas retas uma estimativa do limite de escoamento do material.

Figura 58 - Gráficos tensão-deformação dos CPs ensaiados.







Fonte: [Autor]

O limite de escoamento é a propriedade que determina a máxima resistência que um material pode sofrer em serviço. A tabela 11 mostra os valores obtidos de limite de escoamento, limite de resistência e alongamento no ensaio.

O aço apresentou a média de 391,10 MPa de limite de escoamento, 555,30 de limite de resistência e 1,62 % de alongamento. O valor do limite de resistência atende as especificações para fabricação de vergalhões. Os limites de resistência e o alongamento quase que inexistente podem ser aumentados com o refino dos grãos do aço pelo processo de laminação. Desta forma também pode-se ter um aumento significativo no limite de resistência obtido. A tabela 12 mostra algumas exigências que devem ser seguidas para fabricações de vergalhões.

**Tabela 11 - Propriedades mecânicas do aço SAE 1644.**

<b>Propriedades Mecânicas</b>			
<b>Corpo de prova</b>	<b>Limite de Escoamento (MPa)</b>	<b>Limite de Resistência (MPa)</b>	<b>Alongamento (%)</b>
<b>1</b>	389,00	595,00	0,00
<b>2</b>	406,00	562,00	0,37
<b>3</b>	400,00	535,00	0,00
<b>4</b>	411,00	512,00	0,90
<b>5</b>	378,00	448,00	0,00
<b>6</b>	403,00	619,00	3,97
<b>7</b>	382,00	606,00	3,79
<b>8</b>	385,00	473,00	1,06
<b>9</b>	382,00	606,00	3,79
<b>10</b>	375,00	597,00	2,36
<b>Média</b>	<b>391,10</b>	<b>555,30</b>	<b>1,62</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>12,81</b>	<b>60,67</b>	<b>1,69</b>

Fonte: [Autor]

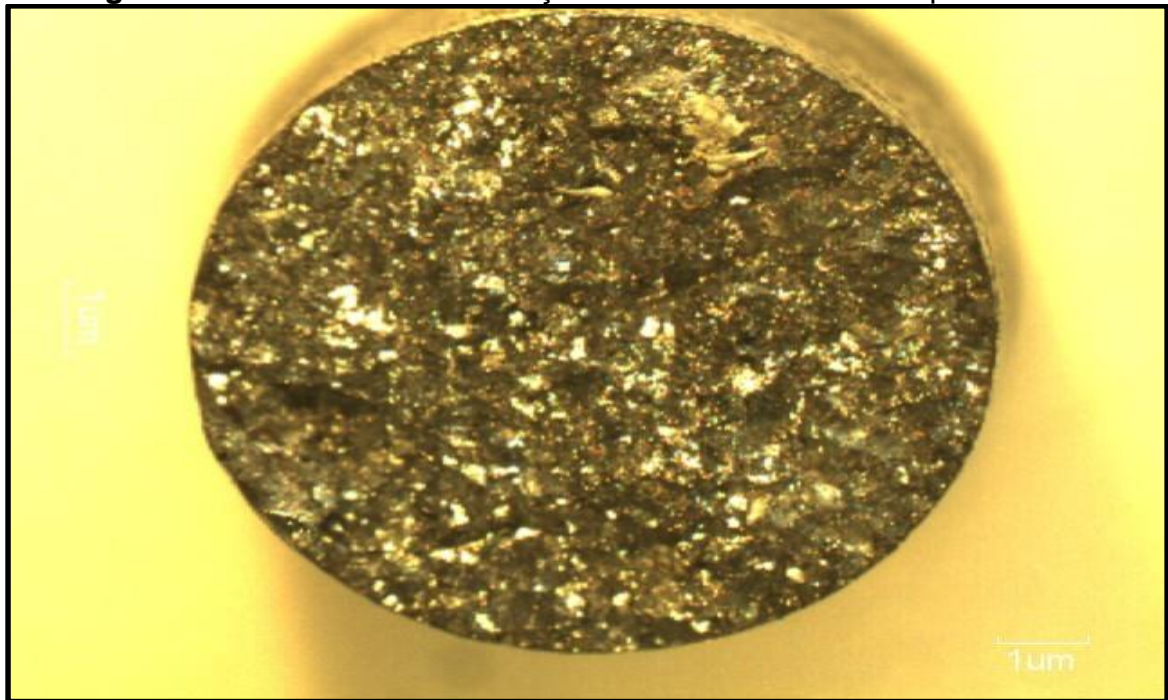
**Tabela 12 - Especificações de propriedades mecânicas dos vergalhões definidas na norma ABNT NBR 7480.**

<b>Categoria</b>	<b>Valores Mínimos</b>			<b>Ensaio de Dobramento a 180°</b>	
	<b>Limite de Escoamento (Le) MPa</b>	<b>Limite de Resistência (Lr) MPa</b>	<b>Alongamento (%)</b>	<b>Diâmetro do pino (mm)</b>	
				<b>Ø &lt; 20</b>	<b>Ø ≥ 20</b>
<b>CA-25</b>	250	1,20 x Le	18	2 x Ø	4 x Ø
<b>CA-50</b>	500	1,08 x Le	8	3 x Ø	6 x Ø
<b>CA-60</b>	600	1,05 x Le	5	5 x Ø	-

Fonte: [33]

A estrutura fraturada foi observada em microscópio estéreo onde novamente observou-se a fratura por clivagem juntamente com os grãos grosseiros. A estrutura fraturada é aproximadamente perpendicular a tensão de tração aplicada produzindo uma superfície quase que totalmente plana e brilhante, conforme observado na figura 59.

**Figura 59** - Fratura do CP de tração observada no microscópio estéreo.

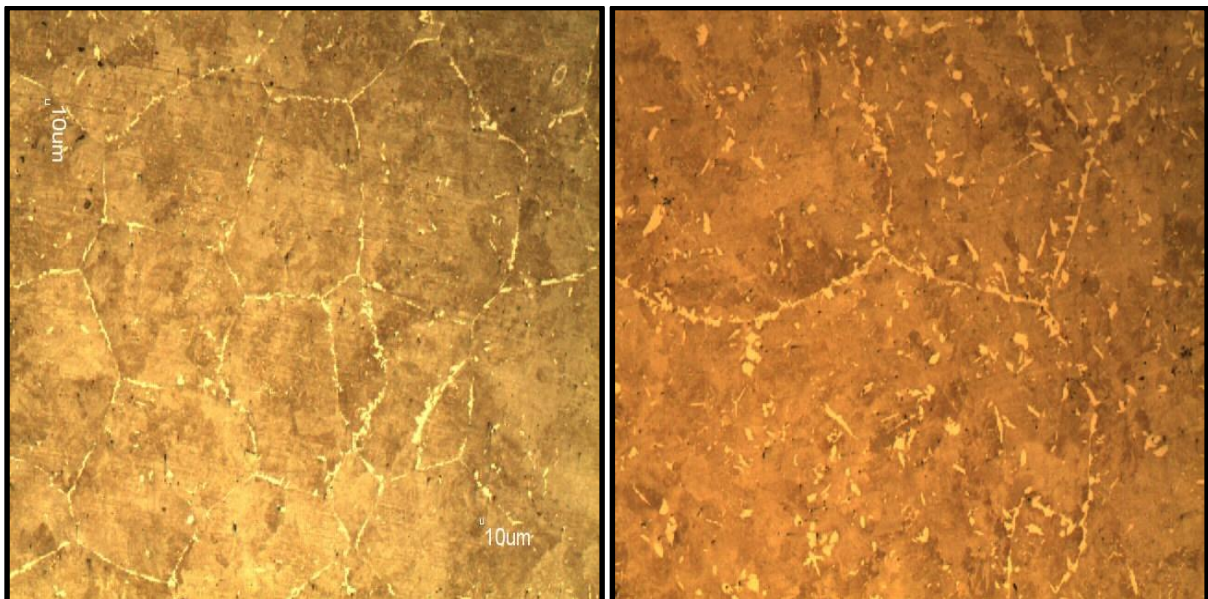


Fonte: [Autor]

#### 4.6. ANÁLISE METALGRÁFICA

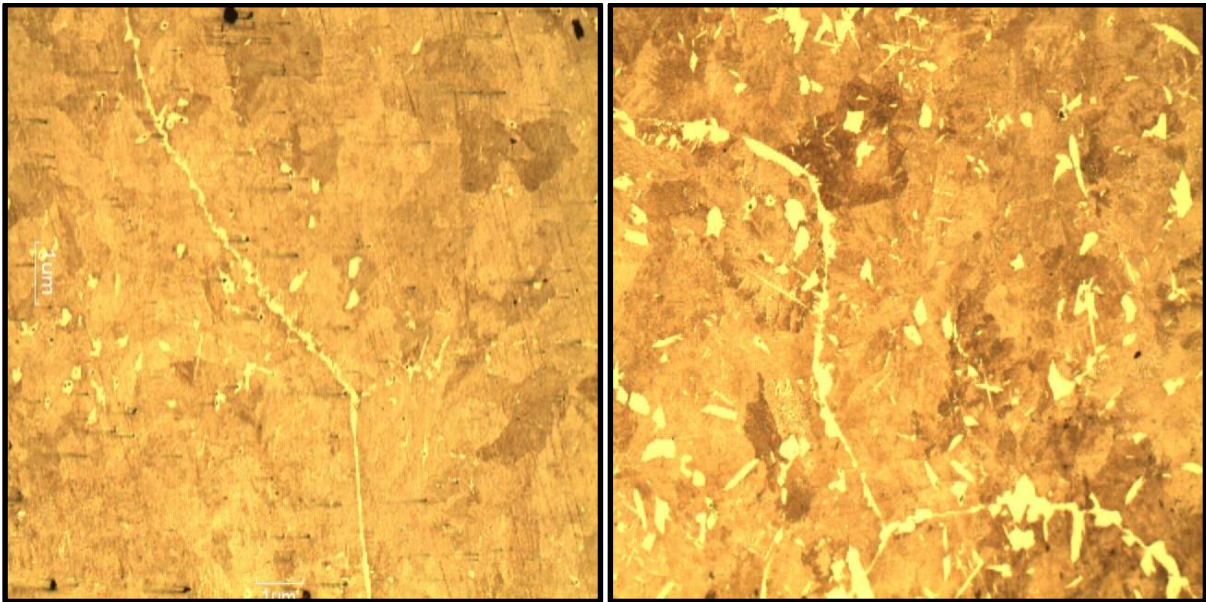
As figuras 60, 61, 62, 63 e 64 mostram a microestrutura do aço após ataque de picral 4%, no microscópio ótico, com aumento de 50x, 100x, 200x, 500x e 1000x.

**Figura 60** - Microestrutura observada, após ataque de picral 4%, com aumento de 50x.



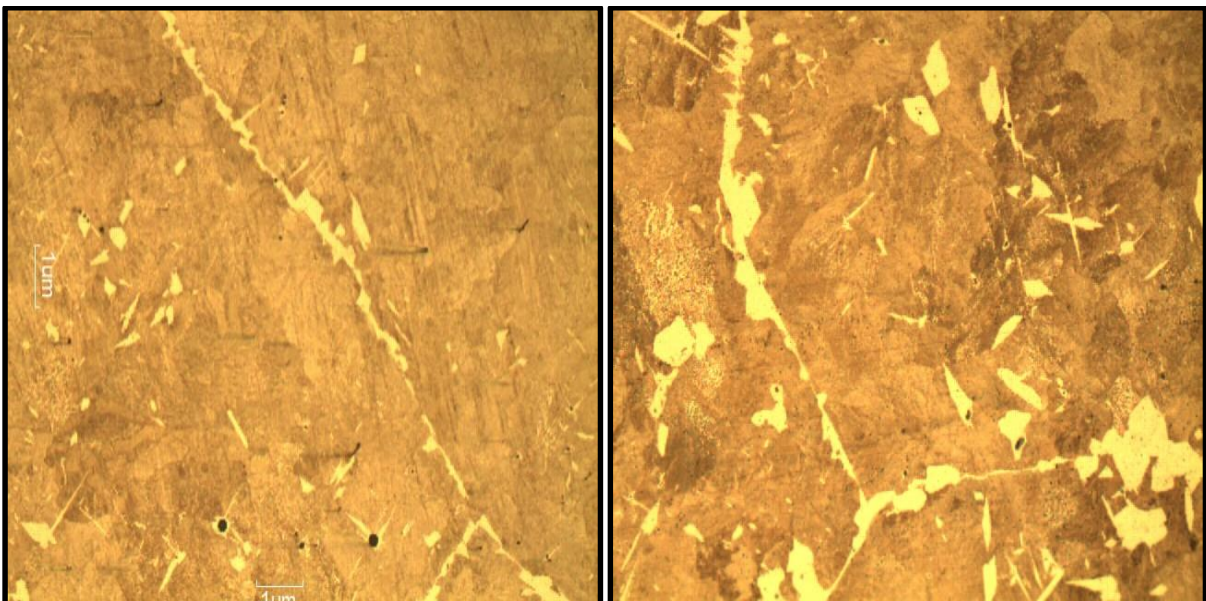
Fonte: [Autor]

**Figura 61** - Microestrutura observada, após ataque de picral 4%, com aumento de 100x.



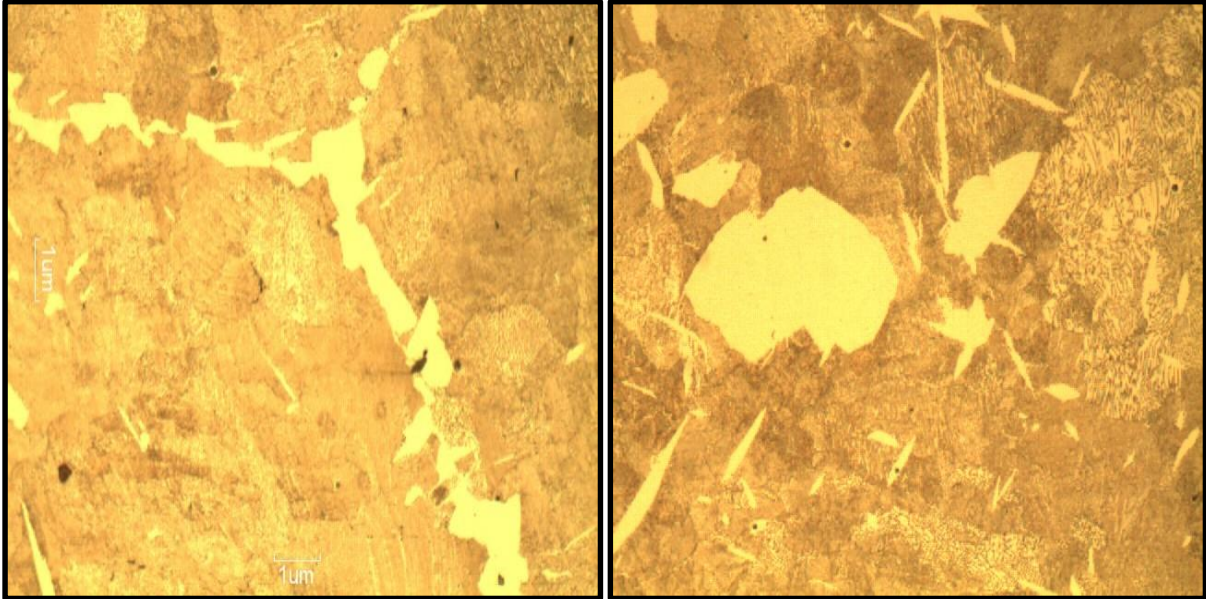
Fonte: [Autor]

**Figura 62** - Microestrutura observada, após ataque de picral 4%, com aumento de 200x.



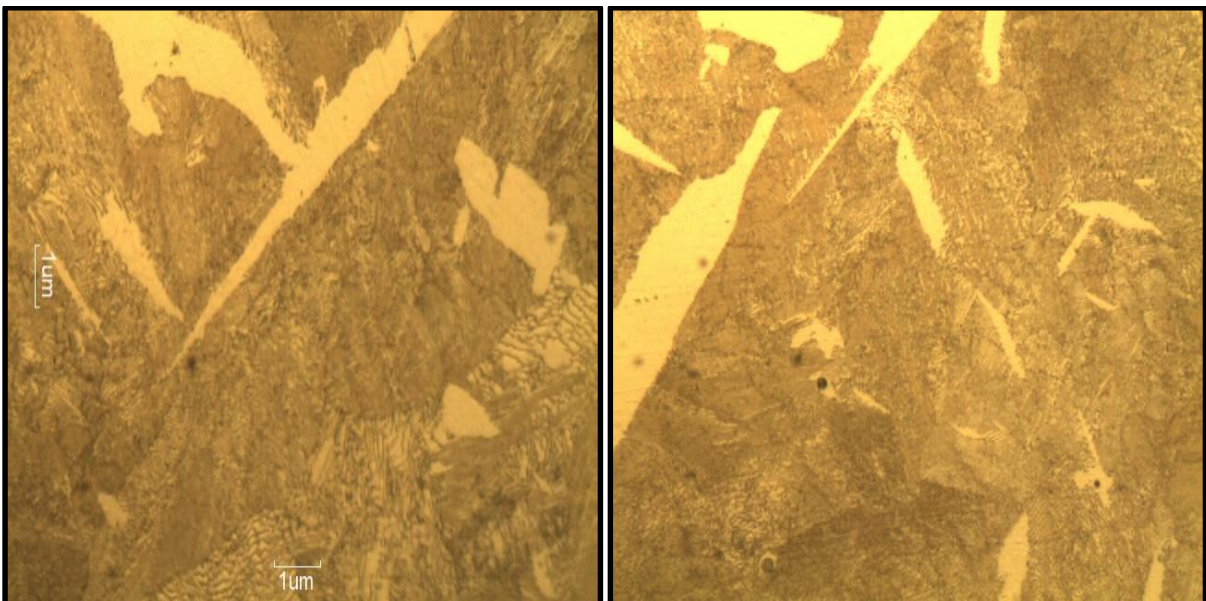
Fonte: [Autor]

**Figura 63** - Microestrutura observada, após ataque de picral 4%, com aumento de 500x.



Fonte: [Autor]

**Figura 64** – Microestrutura observada, após ataque de picral 4%, com aumento de 1000x.



Fonte: [Autor]

A microestrutura revelada é bem diferente das microestruturas comuns de aços ferro carbono, onde temos a fase perlítica (escura) e ferrítica (clara) distribuídas de acordo com o teor de carbono do aço. Na microestrutura em questão observa-se a predominância da fase perlítica com quase inexistência de fase ferrítica e uma fase

bem clara e com formato bem irregular. Esta fase se deve aos precipitados formados pela adição de vanádio e estão distribuídas por toda microestrutura do aço.

A alta solubilidade do vanádio na austenita faz com que estes precipitados, que são carbonetos e nitretos de vanádio, se formem durante o resfriamento do produto, no momento da transformação da austenita para ferrita. Estes precipitados, agem como barreiras físicas para o movimento de discordâncias, elevando assim as propriedades mecânicas do material, sendo este o mecanismo de endurecimento por precipitação. Quanto mais finos e dispersos estes precipitados, mais elevado será o ganho de resistência. Os carbonetos e nitretos de vanádio apresentam estrutura cristalina cúbica de face centrada.

#### 4.7. ENSAIO JOMINY

A tabela 13 mostra os valores de dureza em HRC, na seção longitudinal, obtidos no ensaio Jominy, seguidas dos respectivos desvios padrões, nas distâncias convertidas para milímetros.

**Tabela 13** - Resultado da dureza obtida no ensaio Jominy.

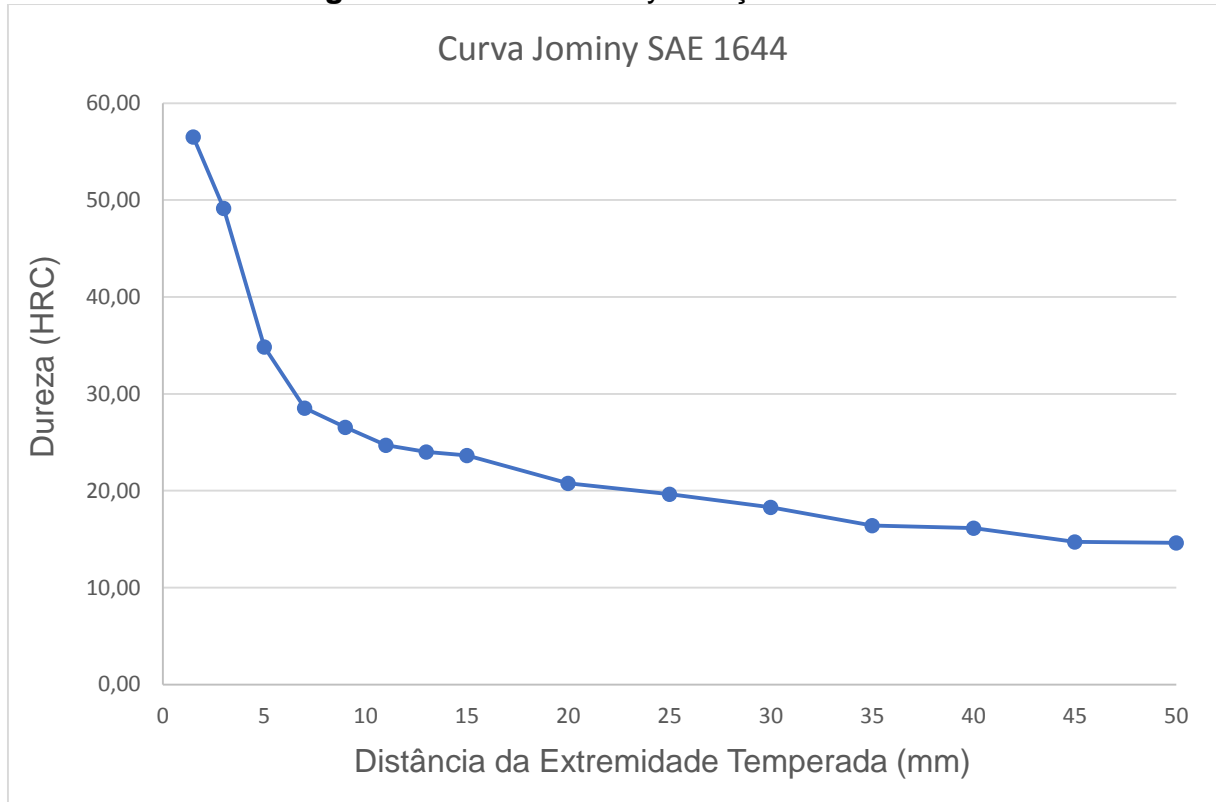
<b>DUREZA OBTIDA NO ENSAIO JOMINY (HRC)</b>										
<b>Distância da Extremidade Temperada (mm)</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>	<b>V</b>	<b>VI</b>	<b>VII</b>	<b>VIII</b>	<b>Médias</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>1,5</b>	58,3	56,1	55,4	56,1	55,1	54,8	56,2	60,1	<b>56,51</b>	<b>1,80</b>
<b>3</b>	48,6	52,0	48,0	48,9	50,3	41,9	51,4	52,0	<b>49,14</b>	<b>3,31</b>
<b>5</b>	38,1	35,3	33,8	33,1	33,3	29,7	38,8	36,6	<b>34,84</b>	<b>2,99</b>
<b>7</b>	28,4	24,7	30,5	29,9	27,4	28,7	29,1	29,5	<b>28,53</b>	<b>1,81</b>
<b>9</b>	28,1	25,9	26,7	26,1	24,4	27,6	26,8	26,8	<b>26,55</b>	<b>1,13</b>
<b>11</b>	27,3	20,1	25,7	24,0	23,9	24,8	26,8	25,1	<b>24,71</b>	<b>2,22</b>
<b>13</b>	25,5	23,5	25,1	23,7	19,7	25,7	23,9	24,9	<b>24,00</b>	<b>1,93</b>
<b>15</b>	24,5	22,9	24,8	22,7	21,9	23,1	24,7	24,6	<b>23,65</b>	<b>1,13</b>
<b>20</b>	21,3	19,3	20,3	23,2	21,3	18,6	20,7	21,5	<b>20,78</b>	<b>1,42</b>
<b>25</b>	19,3	19,5	21,1	19,5	18,2	19,6	20,6	19,5	<b>19,66</b>	<b>0,87</b>
<b>30</b>	18,9	18,8	20,0	19,3	16,3	17,8	16,8	18,6	<b>18,31</b>	<b>1,26</b>
<b>35</b>	17,8	16,8	17,5	17,3	14,5	17,9	14,7	14,9	<b>16,43</b>	<b>1,47</b>
<b>40</b>	16,2	15,3	16,0	19,7	14,8	16,7	15,0	15,5	<b>16,15</b>	<b>1,57</b>
<b>45</b>	15,0	16,0	14,8	13,7	13,7	15,9	14,0	14,6	<b>14,71</b>	<b>0,90</b>
<b>50</b>	15,5	16,3	13,7	13,5	13,5	15,7	13,9	14,9	<b>14,63</b>	<b>1,12</b>

Fonte: [Autor]

A partir dos dados obtidos nos pontos de dureza do corpo de prova, foi possível o levantamento da curva Jominy do aço SAE 1644, mostrada na figura 65. A partir do

levantamento da curva, percebe-se que o aço em estudo apresenta uma boa temperabilidade devido ao grande ganho de dureza para até 56,51 HRC.

**Figura 65** - Curva Jominy do aço SAE 1644.



**Fonte:** [Autor]

Prosseguindo com as análises, cortou-se a extremidade temperada, a qual passou por todo o processo de preparação, e em seguida realizou-se novamente medidas de dureza na seção transversal. Desta forma, com a coleta dos resultados podemos confrontar as durezas obtidas na peça sem nenhum tratamento com as durezas obtidas na peça que passou pelo processo de têmpera. Essa comparação não poderia ser feita com os resultados obtidos na seção retificada pelo fato de que aquela região está no sentido longitudinal, podendo haver diferenças grandes de dureza. Novamente foram medidos 20 pontos de dureza os quais são mostrados na tabela 14.

**Tabela 14** – Dureza obtida na extremidade temperada do aço SAE 1644.

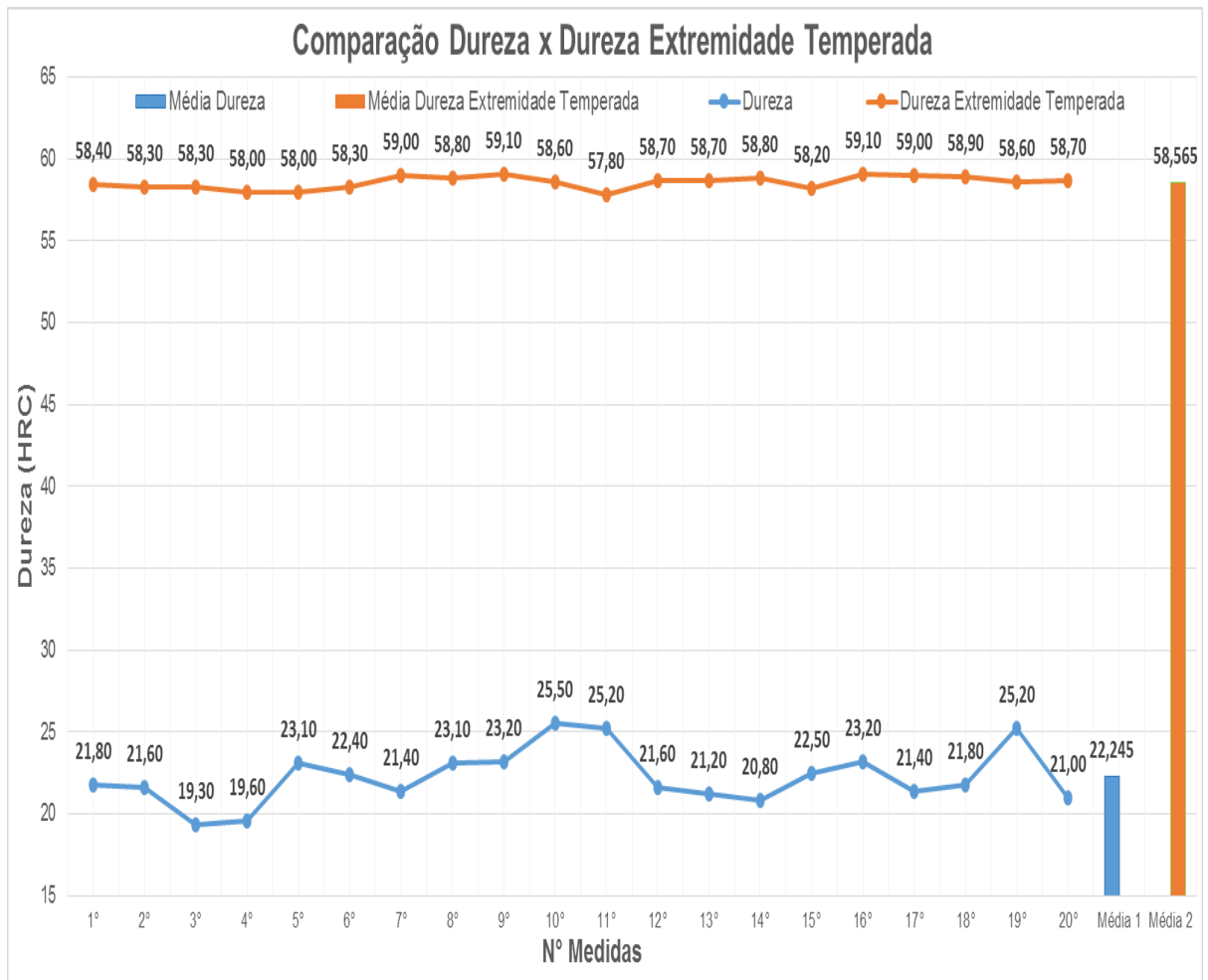
<b>Dureza da extremidade temperada do aço SAE 1644</b>		
<b>Resultados (HRC)</b>	<b>1°</b>	<b>58,40</b>
	<b>2°</b>	<b>58,30</b>
	<b>3°</b>	<b>58,30</b>
	<b>4°</b>	<b>58,00</b>
	<b>5°</b>	<b>58,00</b>
	<b>6°</b>	<b>58,30</b>
	<b>7°</b>	<b>59,00</b>
	<b>8°</b>	<b>58,80</b>
	<b>9°</b>	<b>59,10</b>
	<b>10°</b>	<b>58,60</b>
	<b>11°</b>	<b>57,80</b>
	<b>12°</b>	<b>58,70</b>
	<b>13°</b>	<b>58,70</b>
	<b>14°</b>	<b>58,80</b>
	<b>15°</b>	<b>58,20</b>
	<b>16°</b>	<b>59,10</b>
	<b>17°</b>	<b>59,00</b>
	<b>18°</b>	<b>58,90</b>
	<b>19°</b>	<b>58,60</b>
	<b>20°</b>	<b>58,70</b>
	<b>Média</b>	<b>58,57</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,39</b>	

Fonte: [Autor]

Com os resultados obtidos, construiu-se o gráfico da comparação de dureza antes e depois do tratamento de temperabilidade mostrado na figura 66. O aço teve um grande ganho de dureza de 22,25 HRC para 58,56 HRC. A dureza após o tratamento apresentou uma variação pequena de resultados, já a dureza antes do tratamento apresenta variações de 19,30 HRC até valores de 25,50 HRC. Isto acontece pelo fato de os precipitados de vanádio terem durezas bastante elevadas, e como encontram-se distribuídos irregularmente na microestrutura (como mostrado nas análises metalográficas), aumentam apenas a durezas de certas regiões causando essa variação de dureza observada. Após o tratamento esses precipitados se dissolvem e se arranjam de forma mais uniforme por toda microestrutura. Assim temos um aumento de dureza do material além de uma menor variação dos valores obtidos de dureza.



**Figura 66** – Gráfico da comparação Dureza na região transversal x Dureza na extremidade temperada na região transversal.



**Fonte:** [Autor]

Após a realização do ensaio Jominy, foi realizada outra análise química da extremidade temperada do aço em estudo, com o objetivo de se observar o êxito do tratamento realizado. A tabela 15 mostra a análise química realizada após o tratamento. Percebe-se que os elementos continuam nas suas faixas de composição próximas a composição antes do ensaio, desta forma conclui-se que não houve erros na realização do ensaio que poderiam gerar a descarbonetação do aço, confirmando o êxito na realização no ensaio Jominy. Outra observação importante é o fato de a composição se manter a mesma e se ter uma grande adição de dureza no material, assim fica evidente que houve uma modificação de microestrutura do material para tal ganho de dureza.

**Tabela 15** - Análise química da extremidade temperada.

<b>Análise Química</b>							
<b>N°</b>	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>
<b>1</b>	0,445	0,172	0,969	0,016	0,010	0,092	0,014
<b>2</b>	0,443	0,169	0,950	0,017	0,009	0,093	0,014
<b>3</b>	0,448	0,165	0,945	0,017	0,010	0,092	0,014
<b>4</b>	0,452	0,174	0,950	0,022	0,014	0,093	0,014
<b>MÉDIA</b>	<b>0,447</b>	<b>0,170</b>	<b>0,954</b>	<b>0,018</b>	<b>0,011</b>	<b>0,093</b>	<b>0,014</b>
<b>DS</b>	<b>0,004</b>	<b>0,004</b>	<b>0,011</b>	<b>0,003</b>	<b>0,002</b>	<b>0,001</b>	<b>0,000</b>

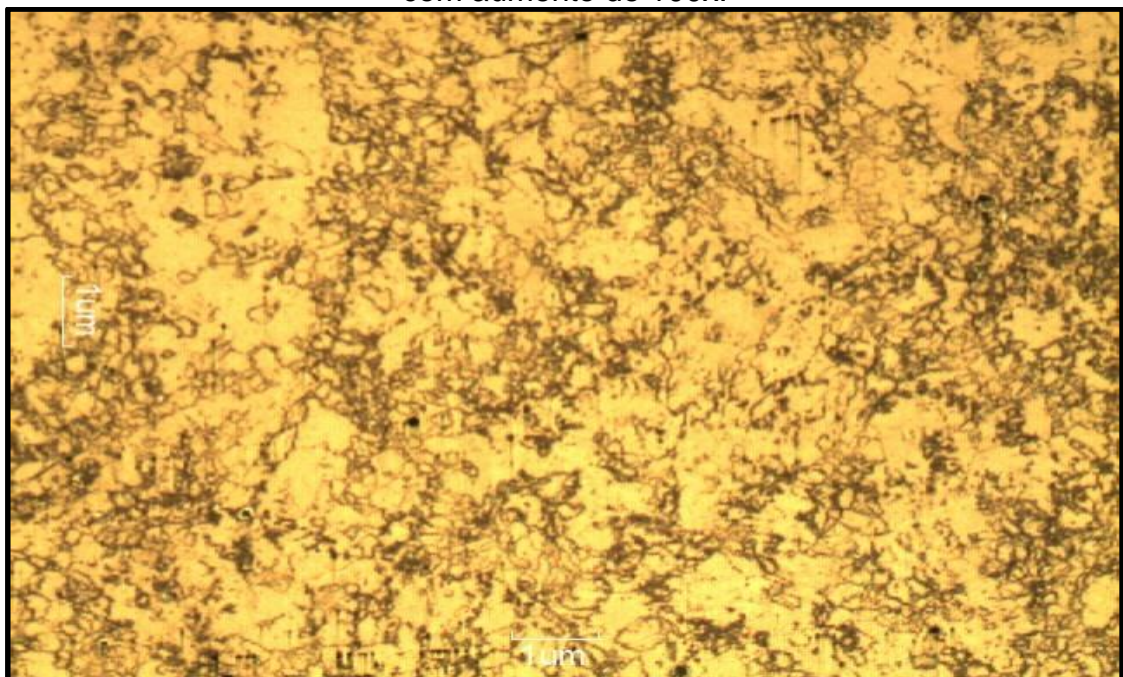
  

<b>Análise Química</b>							
<b>Ni</b>	<b>V</b>	<b>Cu</b>	<b>Nb</b>	<b>Sn</b>	<b>N</b>	<b>Mn/S</b>	<b>Mn/Si</b>
<b>0,061</b>	0,034	0,210	0,001	0,016	0,010	96,900	5,634
<b>0,062</b>	0,032	0,213	0,001	0,014	0,013	105,556	5,621
<b>0,060</b>	0,031	0,212	0,001	0,015	0,010	94,500	5,727
<b>0,062</b>	0,035	0,212	0,001	0,016	0,011	67,857	5,460
<b>0,061</b>	<b>0,033</b>	<b>0,212</b>	<b>0,001</b>	<b>0,015</b>	<b>0,011</b>	<b>91,203</b>	<b>5,611</b>
<b>0,001</b>	<b>0,002</b>	<b>0,001</b>	<b>0,000</b>	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	<b>16,272</b>	<b>0,111</b>

Fonte: [Autor]

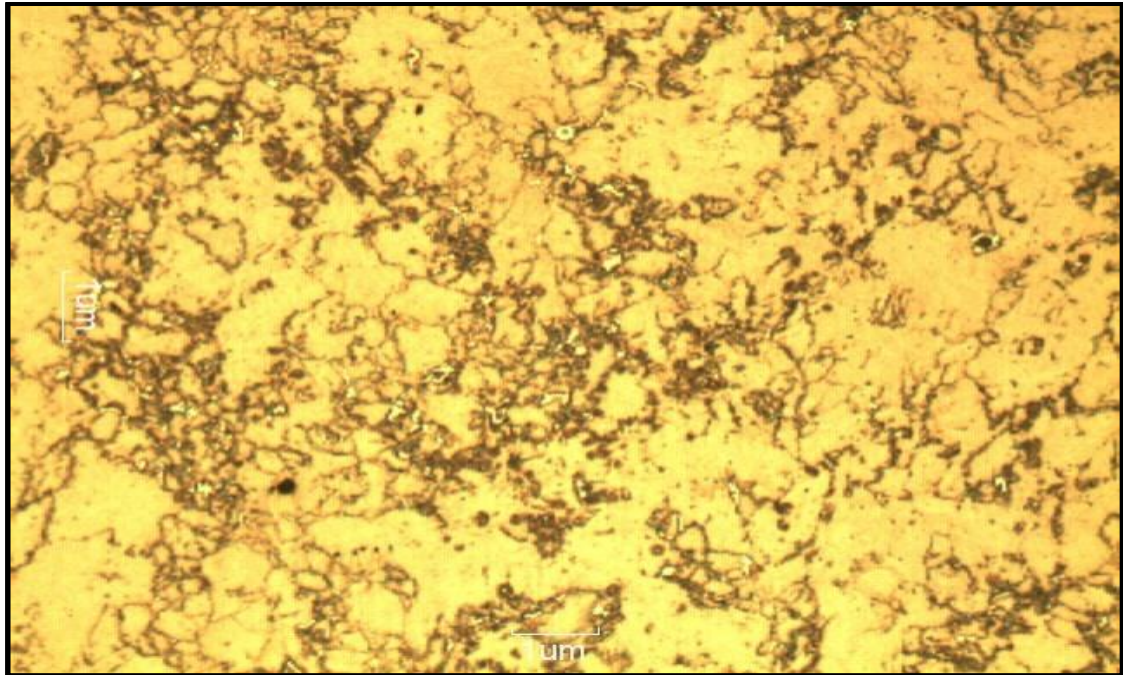
Em seguida realizou-se também uma análise da microestrutura temperada após ataque de picral 4%, no microscópio ótico, conforme mostrado nas figuras 67, 68, 69, 70, nos aumentos de 100x, 200x, 500x e 1000x respectivamente.

**Figura 67** - Microestrutura da extremidade temperada, após ataque de picral 4%, com aumento de 100x.



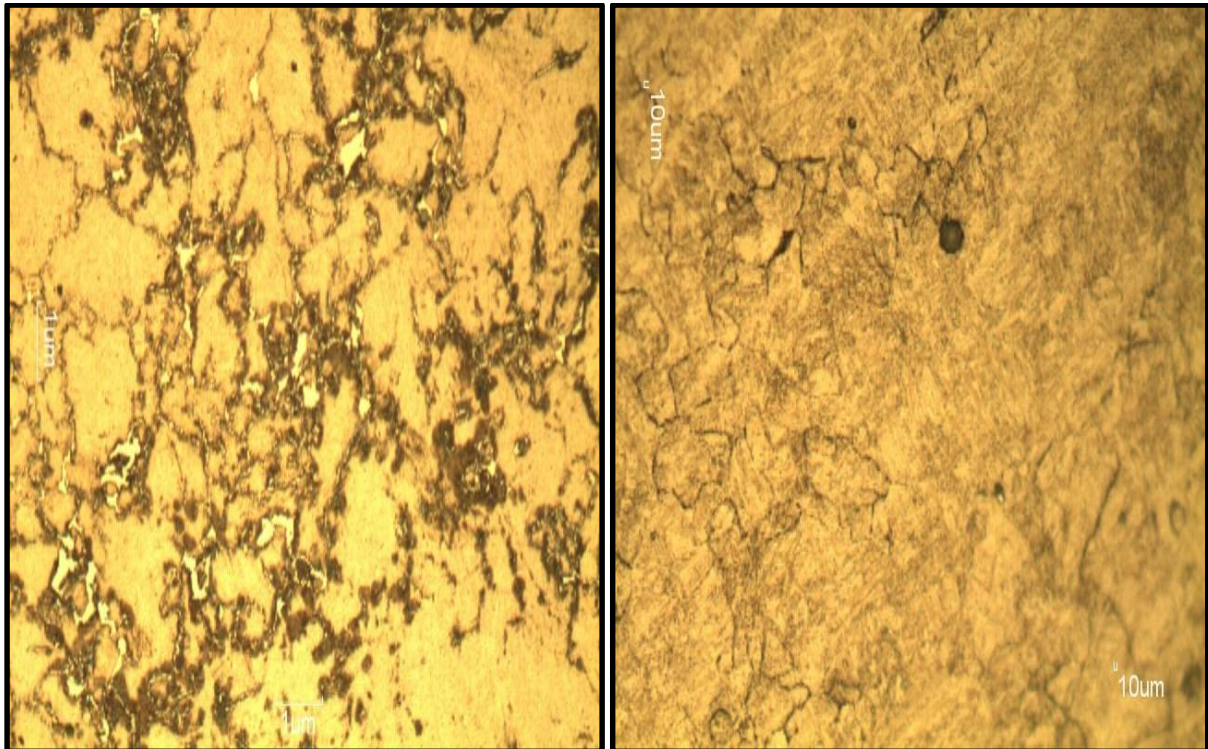
Fonte: [Autor]

**Figura 68** - Microestrutura da extremidade temperada, após ataque de picral 4%, com aumento de 200x.



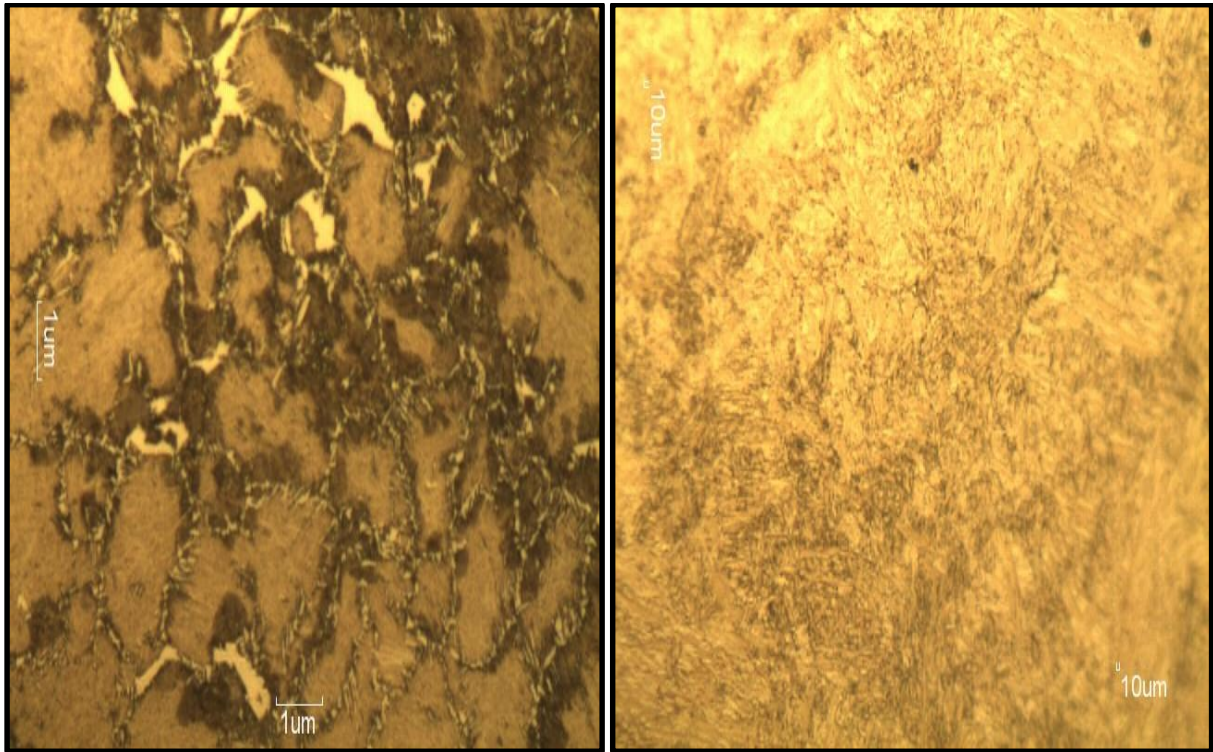
Fonte: [Autor]

**Figura 69** - Microestrutura da extremidade temperada, após ataque de picral 4%, com aumento de 500x.



Fonte: [Autor]

**Figura 70** - Microestrutura da extremidade temperada, após ataque de picral 4%, com aumento de 1000x.



**Fonte:** [Autor]

Diferente da microestrutura observada antes do tratamento a microestrutura resultante apresenta uma redução da região clara e irregular apresentada nas microestruturas anteriores, isto pode estar relacionado a solubilização dos precipitados de vanádio formando precipitados menores e mais uniformes o que gera um aumento da dureza observada no matéria, o vanádio também é responsável pelo refino dos grãos e pelo retardamento de recuperação e da recristalização da fase austenítica devido a sua alta solubilidade nesta fase.

Outro fator para o grande aumento de dureza é a formação de pequenas agulhas de martensita, mostradas nos aumentos de 500x e 1000x, juntamente com o aumento do refino dos grãos em relação a microestrutura não tratada, para uma análise mais detalhada dessa microestrutura recomenda-se análises mais complexas com MEV, pois desta forma pode-se identificar os elementos presentes em cada fase com mais precisão.

## 5. CONCLUSÕES

Tendo como base a metodologia e os resultados obtidos neste trabalho, para levantamento da curva Jominy e caracterização mecânica do aço SAE 1644, podem-se tomar as seguintes conclusões:

- O aço em estudo atende a composição química estabelecida, possuindo um CE de 0,660 o que revela sua alta temperabilidade e sua má característica de soldabilidade.
- Quanto a dureza o aço apresenta uma faixa de aproximadamente 22,25 HRC o que revela seu elevado percentual de carbono, mostrando que se trata de um aço com dureza elevada.
- Quanto ao ensaio de Charpy o aço apresenta uma absorção de energia bastante baixa de 6,63 J, o que reflete sua elevada dureza e o tipo de fratura frágil observada.
- Quanto aos ensaios mecânicos de tração e dobramento, percebe-se que por se tratar de um aço com grãos brutos, que não passaram por um processo de refino, o aço apresenta valores de limite de escoamento de 391,10 MPa, limite de resistência de 555,30 MPa, e um alongamento quase que inexistente de 1,62%. Vale ressaltar que com posteriores processos de refino pode-se ter uma adição dessas propriedades bastante elevada. Todas as fraturas observadas são de natureza frágil, do tipo fratura por clivagem, onde temos uma estrutura fraturada aproximadamente perpendicular a tensão de tração aplicada, produzindo uma superfície quase que totalmente plana e bastante brilhante.
- Quanto a análise metalográfica, o aço apresenta uma microestrutura distinta, perlítica, com precipitados referentes a ação do vanádio. Após sua temperabilidade há formação de pequenas agulhas martensíticas, além do refino de grãos e dissolução desses precipitados, o que gera um grande ganho de dureza no material.
- Quanto ao levantamento da curva de Jominy, o aço apresentou uma boa temperabilidade devido ao grande ganho de dureza na ordem de 56,51 HRC.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho pode ser complementado através das seguintes sugestões de trabalhos futuros:

- Realizar tratamentos térmicos no aço SAE 1644, como normalização, têmpera e revenido com o objetivo de observar as propriedades obtidas pelo material bem como a microestrutura resultante.
- Realizar tratamentos térmicos em diferentes temperaturas e condições, e avaliar as propriedades obtidas em cada condição.
- Realizar tratamento termoquímicos no aço SAE 1644, de cementação, nitretação e carbonitretação e observar as propriedades obtidas, com foco principal na nitretação, visto que o vanádio tem grande afinidade com o nitrogênio na formação de nitretos.
- Realizar análises microscópicas no MEV, e avaliar todas as fases e elementos presentes no aço, avaliando qual o mecanismo de endurecimento e quais fases formadas mais importantes para garantir a resistência mecânica do aço.
- Realizar experimentos de conformação mecânica no aço, bem como a laminação e observar o aumento das propriedades mecânicas e se as mesmas atendem as normas técnicas específicas.

## 7. REFERÊNCIAS

- 1 - RIZZO, Ernandes Marcos da Silveira. **Introdução aos processos siderúrgicos**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005.
- 2 - MARTINS, Marcelo. **“Temperabilidade Jominy e Influência do Revenido sobre a dureza - Um Estudo em Aços Estruturais Nacionais”**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2002.
- 3 - VAN VLACK, Lawrence Hall. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais**. Rio de Janeiro: Elsevier, 1984.
- 4 - FERREIRA, Aurélio Buarque de Holanda. **Miniaurélio Século XXI: O minidicionário da língua portuguesa**. 5<sup>o</sup> ed. ver. Ampliada. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 2001.
- 5 - CASTRO, Felipe Ribeiro de. **Avaliação do comportamento mecânico e tenacidade a fratura do aço SAE/AISI 4140 submetido a tratamento térmico criogênico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais). Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campos dos Goytacazes, 2013.
- 6 - CALLISTER Jr., William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7<sup>o</sup> ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- 7 - SHACKELFORD, James F. **Introdução à ciência dos materiais para engenheiros**. 6<sup>o</sup> ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
- 8 - CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7<sup>o</sup> ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.
- 9 - SINOBRAS – Siderúrgica Norte Brasil S.A. **Padrão de Fabricação. Aço SI 1644-D**. SI-PF-310151210-043-7 1 p. 2014.
- 10 - SOUZA NETO, Erson Alves de. **Estudo avaliativo da resistência ao impacto de um aço ASTM A131 submetido a tratamento termoquímico**. Trabalho de conclusão de curso (Monografia). Universidade Federal do Pará. Marabá. 2013.
- 11 - RIZZO, Ernandes Marcos da Silveira. **Processos de Laminação dos aços: uma introdução**. São Paulo. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.
- 12 - CALLISTER Jr, William D. **Materials science and engineering: an introduction**. 7th ed. Copyright, 2007.
- 13 - CHIAVERINE, Vicente. **Tecnologia mecânica. v.3 Materiais de construção mecânica**. 2<sup>o</sup> ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- 14 - DAROIT, Mateus. **Estudo de aço microligado ao vanádio para produção de barra nervurada para concreto armado com característica de soldabilidade segundo norma ABNT NBR 8965:1985**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012.

- 15 - CANAAN, Gustavo Levy. **Influência da adição de vanádio nas propriedades mecânicas de aços médio teor de carbono para beneficiamento.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.
- 16 - SILVA, André Luiz da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e Ligas Especiais.** 2ª ed. Sumaré, SP: Eletrometal S.A. Metais Especiais. 1988
- 17 - GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Álvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos; CHEUNG, Noé. **Lingotamento contínuo de aços.** Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2006. 320p
- 18 - PADILHA, Angelo Fernando; AMBROSIO FILHO, Francisco. **Técnicas de análise microestrutural.** Hemus, 2004.
- 19 - CHAVES, Marcela Dias. **Caracterização de tubos de aço utilizado em perfuratrizes de circulação reversa.** Trabalho de conclusão de curso (Monografia). Universidade Federal do Pará. Marabá. 2013.
- 20 - OLIVEIRA, Alessandro D; CLAIN, Almir F. **Estudo Comparativo da Espectrometria de Emissão Atômica com Fonte de Plasma Indutivamente Acoplado com a Espectrometria de Emissão Atômica com Fonte de Centelha para Análise Quantitativa de Aço.** Revista TECCEN — volume 3 – número 1 - abril de 2010 – ISSN 1984-0993.
- 21 - SOUZA, Sérgio Augusto de. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos.** Fundamentos teóricos e práticos. São Paulo: Edgard Blücher, 1982.
- 22 – GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaio dos materiais.** Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- 23 - RODRIGUES, Mayara Camila dos Santos. **Estudo de um aço SAE 1140 submetido a tratamentos térmicos.** Trabalho de conclusão de curso (Monografia). Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará. Marabá. 2014.
- 24 – MONTEIRO, Douglas F. **Seleção e especificação de materiais metálicos para construção mecânica: do cálculo mecânico ao tratamento térmico.** 1ª ed. São José do Rio Preto, SP: Editora Raízes do Brasil, 2013.
- 25 – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM-E18 - **Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials.** ASTM, 2012.
- 26 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6153 – **Produtos Metálicos – Ensaio de Dobramento Semi-guiado.** ABNT, 1988.
- 27 – SILVA, Juliana Rodrigues da. **Transição dúctil-frágil do aço naval ASTM A131.** Trabalho de conclusão de curso (Monografia). Universidade Federal do Pará. Marabá. 2013.
- 28 - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM-E23. **Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials.** ASTM, 2005.
- 29 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 6892. **Materiais Metálicos Ensaio de Tração à temperatura ambiente.** ABNT, 2002.



30 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 6673. **Produtos planos de aço – Determinação das propriedades mecânicas à tração.** ABNT, 1981.

31 - VILA NOVA, Otiniel de Sousa. **Análise da temperabilidade de um aço ABNT 1024 aplicado em vergalhão da empresa SINOBRAS S/A.** Trabalho de conclusão de curso (Monografia). Universidade Federal do Pará. Marabá. 2013.

32 - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM-A255. **Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel.** ASTM, 2002.

33 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7480. **Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - Especificação** ABNT, 2007.