



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

**RAYLISON BRUNO PIRES GONÇALVES**

**ESTUDO AVALIATIVO DA RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE UM AÇO SAE 4140  
APÓS TRATAMENTO TERMOQUÍMICO DE CEMENTAÇÃO**

**MARABÁ-PA  
2014**

RAYLISON BRUNO PIRES GONÇALVES

**ESTUDO AVALIATIVO DA RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE UM AÇO SAE 4140  
APÓS TRATAMENTO TERMOQUÍMICO DE CEMENTAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Faculdade de  
Engenharia de Materiais como requisito  
para obtenção do título de bacharel em  
Engenharia de Materiais. Orientador:  
Prof. Esp. Márcio Paulo de Araújo  
Mafra.

MARABÁ-PA  
2014

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

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

---

Gonçalves, Raylison Bruno Pires

Estudo avaliativo da resistência ao impacto de um aço SAE 4140 após tratamento termoquímico de cementação / Raylison Bruno Pires Gonçalves; orientador, Márcio Paulo de Araújo Mafra. — 2014.

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

1. Aço - Tratamento térmico. 2. Metais – Propriedades mecânicas. 3. Termoquímica I. Mafra, Márcio Paulo de Araújo, orient. II. Título.

CDD: 23. ed.: 620.17

---

RAYLISON BRUNO PIRES GONÇALVES

**ESTUDO AVALIATIVO DA RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE UM AÇO SAE 4140  
APÓS TRATAMENTO TERMOQUÍMICO DE CEMENTAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Faculdade de  
Engenharia de Materiais como requisito  
para obtenção do título de bacharel em  
Engenharia de Materiais. Orientador:  
Prof. Esp. Márcio Paulo de Araújo Mafra

Data de aprovação: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Conceito: \_\_\_\_\_

Bancada Examinadora:

\_\_\_\_\_ - Orientador

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

\_\_\_\_\_ - Membro Interno

Prof. Dr. Sílvio Alex Pereira da Mota – UNIFESSPA / FEMAT

\_\_\_\_\_ - Membro Interno

Prof. Dr. Denilson da Silva Costa – UNIFESSPA / FEMMA

## DEDICATÓRIA

Para chegar onde estou hoje sempre contei com a colaboração e ajuda da minha família – **ANA CLAUDIA PIRES GONÇALVES** e **JOÃO BATISTA GONÇALVES**, meus pais.

Dedico este trabalho à cada pessoa que de maneira direta e indireta colaborou em minha formação acadêmica, em especial à minha esposa **LIGIA MELO**, que sempre me apoiou dando forças para que eu pudesse alcançar meu objetivo ao longo desses anos e ao meu filho **ADRYAN JOSÉ** que trouxe maravilhas à minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Muitas pessoas, de diferentes maneiras e em diferentes oportunidades, contribuíram para a realização desse trabalho.

Agradeço de modo especial à minha mãe Ana Claudia, pela sua dedicação e apoio nos momentos mais difíceis da minha graduação.

Ao professor Marcio Paulo de Araújo Mafra pela orientação e pelo apoio durante esse trabalho, pelas contribuições inestimáveis.

Agradeço à todos os meus amigos da FEMAT 2010, sempre presentes e atenciosos em muitas oportunidades.

Agradeço também à minha esposa Ligia Melo pelo apoio durante o período da minha graduação.

Agradeço ao apoio dos amigos Jailes Moura e José Salomão, sempre me ajudaram durante o curso.

Ao gerente da aciaria - Sinobras Silvio César, aos líderes de célula nas pessoas no Sr. Rubens Giusti, Cristiano Faustino, Braz Artur, Wesley Mesquita e aos engenheiros Vinicius Costa, Neiclésio, por seus ensinamentos e confiança no meu trabalho desde que comecei minhas atividades na aciaria em Junho de 2014. A todos os colaboradores da aciaria nesse período de estágio.

E por fim a todos que de alguma forma contribuíram para minha formação.

Muito obrigado a todos.

## EPÍGRAFE

*“É melhor tentar e falhar, que preocupar-se e ver a vida passar. É melhor tentar, ainda que em vão que sentar-se, fazendo nada até o final. Eu prefiro na chuva caminhar, que em dias frios em casa me esconder. Prefiro ser feliz embora louco, que em conformidade viver”*

*Martin Luther King*

## RESUMO

O aço é um dos produtos mais versáteis do mundo, sendo utilizado desde embalagens de alimentos até na fabricação de grandes estruturas da construção civil ou naval. O aço SAE 4140 é usado para beneficiamento com temperabilidade média, ligado ao cromo e molibdênio, utilizado na fabricação de diferentes componentes mecânicos como em rolamentos, cilindros, engrenagens, eixos hidráulicos, eixos furados, anéis, porcas e parafusos, tirantes, onde se deseja uma boa combinação de resistência mecânica média e resistência à fratura e também possui elevada resistência à fadiga. O objetivo geral desse trabalho é a análise da resistência ao impacto de um aço SAE 4140 submetido ao tratamento termoquímico de cementação e pós-tratamentos de têmpera e revenido, considerando a temperatura fixa e o tempo de tratamento variado. Analisando através das imagens feitas com o microscópio óptico a metalografia das amostras com tratamento e sem tratamento termoquímico, para verificar a mudança da microestrutura para posteriormente, avaliar a resistência mecânica através dos ensaios de Impacto (Ensaio de Charpy) e Dureza. Assim, através das análises a peça apenas cementada obteve resultados interessantes e a condição 2 obteve os melhores resultados de dureza.

**PALAVRAS CHAVES:** Aço 4140, temperabilidade, tratamento termoquímico, resistência mecânica.

## **ABSTRACT**

Steel is one of the most versatile products in the world, being used from food packaging to the manufacture of large structures or civil shipbuilding. The SAE 4140 steel is used for processing with average hardenability on the chromium and molybdenum, used in the manufacture of various mechanical components such as bearings, cylinders, gears, hydraulic shafts, drilled shafts, rings, nuts and bolts, rods, where you want a good combination of average strength and fracture resistance and also has high resistance to fatigue. Thus, the main objective of this study is to examine the impact resistance of an SAE 4140 steel subjected to thermochemical treatment of carburizing and quenching and tempering treatments after considering the fixed temperature and time varied treatment. By analyzing the images made with the optical microscope of the metallographic samples with and without treatment thermochemical treatment, for checking the change of the microstructure to further evaluate the mechanical resistance through impact tests (Charpy test) and hardness. Thus, through the analysis to only a hardened piece obtained interesting results and condition 2 achieved the best results of hardness.

**KEYWORDS:** Steel 4140, hardenability, thermochemical treatment, mechanical strength.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Diagrama de Fase Ferro - Carbetto de ferro (Fe - Fe <sub>3</sub> C). .....	20
<b>Figura 2</b> - Transformações alotrópicas. ....	22
<b>Figura 3</b> - Região eutetóide do diagrama Fe <sub>3</sub> C e microestrutura esquemática de um aço eutetóide em condições de resfriamento. ....	26
<b>Figura 4</b> - Efeito do fósforo na ductilidade do aço. ....	27
<b>Figura 5</b> - Influência da relação Mn/S na ductilidade do aço. ....	28
<b>Figura 6</b> - Ação relativa na dureza do aço de alguns elementos de liga. ....	29
<b>Figura 7</b> - Efeito de diferentes tratamentos térmicos sobre a resistência a tração. ...	34
<b>Figura 8</b> - Diagrama TTT com as principais zonas de transformação. ....	35
<b>Figura 9</b> - Representação esquemática do tratamento térmico de têmpera. ....	37
<b>Figura 10</b> - Representação esquemática de um microscópio óptico. ....	40
<b>Figura 11</b> - Representação esquemática do ensaio de impacto. ....	42
<b>Figura 12</b> - Dureza Brinell. ....	44
<b>Figura 13</b> - Fluxograma da prática experimental. ....	46
<b>Figura 14</b> - Amostra para metalografia e dureza do aço SAE 4140. ....	48
<b>Figura 15</b> - Corpo de prova para ensaio de impacto. ....	49
<b>Figura 16</b> - Corpos de prova para ensaio de impacto. ....	50
<b>Figura 17</b> - Caixa metálica utilizada no tratamento. ....	52
<b>Figura 18</b> - Amostras distribuídas na caixa metálica. ....	53
<b>Figura 19</b> - Peças já cobertas com camadas de coque de injeção e sílica. ....	54
<b>Figura 20</b> - Controle de temperatura na peça cementada. ....	55
<b>Figura 21</b> - Termopar usado no processo de cementação. ....	56
<b>Figura 22</b> - Amostras dentro do forno. ....	57
<b>Figura 23</b> - Distribuição dos pontos realizados no ensaio de dureza em cada amostra .....	60
<b>Figura 24</b> - Durômetro de bancada. ....	61
<b>Figura 25</b> - Representação esquemática do método de lixamento de trabalho em sentidos alternados. ....	62
<b>Figura 26</b> - Equipamento de ensaio de impacto. ....	64
<b>Figura 27</b> - Micrografia da amostra 1 do aço SAE 4140 sem tratamento. ....	66
<b>Figura 28</b> - Amostras das peças analisadas. ....	68

<b>Figura 29</b> - Amostras de impacto rompidas após ensaio.....	68
<b>Figura 30</b> - Gráfico comparativo das análises químicas do aço SAE 4140. ....	70
<b>Figura 31</b> - Micrografia da amostra do aço SAE 4140 apenas cementada. ....	71
<b>Figura 32</b> - Análise da dureza em diferentes pontos da peça. ....	72
<b>Figura 33</b> - Gráfico das médias da análise de dureza. ....	74
<b>Figura 34</b> - Amostras de impacto rompidas após ensaio.....	75
<b>Figura 35</b> - Gráfico das médias da análise de impacto.....	76
<b>Figura 36</b> - Gráfico comparativo das análises químicas do aço SAE 4140. ....	78
<b>Figura 37</b> - Micrografia da condição 2 do Aço SAE 4140. ....	79
<b>Figura 38</b> - Micrografia da condição 3 do Aço SAE 4140. ....	80
<b>Figura 39</b> - Micrografia da condição 4 do Aço SAE 4140. ....	81
<b>Figura 40</b> - Micrografia da condição 5 do Aço SAE 4140. ....	82
<b>Figura 41</b> - Gráfico comparativo geral entre as condições de tratamentos. ....	85
<b>Figura 42</b> - Gráfico comparativo entre da condição 2. ....	86
<b>Figura 43</b> - Gráfico comparativo entre das condição 3. ....	86
<b>Figura 44</b> - Gráfico comparativo entre da condição 4.....	87
<b>Figura 45</b> - Gráfico comparativo da condição 5.....	88
<b>Figura 46</b> - Gráfico comparativo geral entre as condições. ....	90
<b>Figura 47</b> - Gráfico de Dureza x Tenacidade.....	91

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Nomenclatura AISI e SAE.....	30
<b>Tabela 2</b> - Composição química do aço SAE 4140.....	31
<b>Tabela 3</b> - Distribuição dos tratamentos e das amostras. ....	51
<b>Tabela 4</b> - Proporção dos elementos na cementação.....	52
<b>Tabela 5</b> - Distribuição das amostras para ensaio de Dureza e Metalografia. ....	59
<b>Tabela 6</b> - Análise química do aço SAE 4140 sem tratamento (condição 1). ....	65
<b>Tabela 7</b> - Dureza média e desvio padrão da amostra sem tratamento (condição 1). .....	67
<b>Tabela 8</b> - Energia absorvida pelos corpos de prova de impacto sem tratamentos. .	69
<b>Tabela 9</b> - Composição química após tratamento termoquímico de cementação.....	69
<b>Tabela 10</b> - Dureza média e desvio padrão da amostra cementada.....	73
<b>Tabela 11</b> - Energia absorvida pelos corpos de prova de impacto apenas cementados.....	75
<b>Tabela 12</b> - Composição química após tratamento de têmpera e revenido. ....	77
<b>Tabela 13</b> - Dureza média e desvio padrão geral das condições de tratamentos.....	83
<b>Tabela 14</b> - Energia absorvida pelos corpos de prova de impacto. ....	89

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

<b>SAE</b>	Society Automotive Engineers
<b>Unifesspa</b>	Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará
<b>FEMAT</b>	Faculdade de Engenharia de Materiais
<b>TTT</b>	Tempo – Temperatura – Transformação
<b>Fe</b>	Ferro (Elemento químico)
<b>C</b>	Carbono (Elemento químico)
<b>P</b>	Fósforo (elemento químico)
<b>S</b>	Enxofre (elemento químico)
<b>Mn</b>	Manganês (elemento químico)
<b>Mpa</b>	Mega Pascal
<b>CP</b>	Corpo de Prova
<b>Si</b>	Silício (elemento químico)
<b>Cr</b>	Cromo (elemento químico)
<b>Mo</b>	Molibidênio (elemento químico)
<b>Ni</b>	Níquel (elemento químico)
<b>V</b>	Vanádio (elemento químico)
<b>Al</b>	Alumínio (elemento químico)
<b>Cu</b>	Cobre (elemento químico)
<b>Ti</b>	Titânio (elemento químico)
<b>Nb</b>	Nióbio (elemento químico)
<b>Sn</b>	Estanho (elemento químico)
<b>N</b>	Nitrogênio
<b>HRBw</b>	Dureza Rockwell/Brinell
<b>HRC</b>	Dureza Rockwell

## SUMÁRIO

### CAPÍTULO I

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1- OBJETIVOS.....	16
1.1.1. Objetivos gerais.....	16
1.1.2. Objetivos específicos.....	16

### CAPÍTULO II

<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>17</b>
2.1. AÇOS.....	17
2.1.1. Definição.....	17
2.1.2. Diagrama ferro-carbeto de ferro (Fe – Fe <sub>3</sub> C).....	19
2.1.3. Efeito das impurezas.....	27
2.1.4. Efeitos dos elementos de liga.....	29
2.1.5. Nomenclatura dos aços.....	30
2.1.6. Aço sae 4140.....	31
2.2. TRATAMENTO TERMOQUÍMICO.....	31
2.2.1. Cementação.....	31
2.3. TRATAMENTO TÉRMICO DOS AÇOS.....	33
2.3.1. Têmpera.....	35
2.3.3. Revenido.....	37
2.4. ANÁLISE METALOGRÁFICA.....	39
2.4.1. Microscopia óptica.....	39
2.5. PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	40
2.5.1. Ensaio de impacto.....	41
2.4.2. Ensaio de dureza.....	43

### CAPÍTULO III

<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>46</b>
3.1. PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	47
3.2. TRATAMENTO TERMOQUÍMICO.....	50

<b>3.2.1. Cementação</b> .....	52
<b>3.3. TRATAMENTO TÉRMICO</b> .....	57
<b>3.3.1. Têmpera</b> .....	57
<b>3.3.2. Revenido</b> .....	58
<b>3.4. ANÁLISE QUÍMICA</b> .....	58
<b>3.5. ENSAIO DE DUREZA</b> .....	58
<b>3.6. ANÁLISE DE MICROSCOPIA ÓPTICA</b> .....	61
<b>3.7. ENSAIO DE IMPACTO</b> .....	63

## **CAPÍTULO IV**

<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>65</b>
<b>4.1. AMOSTRA DO AÇO SAE 4140 SEM TRATAMENTO</b> .....	65
<b>4.1.1. Análise química</b> .....	65
<b>4.1.2. Análise metalográfica</b> .....	66
<b>4.1.3. Análise de dureza</b> .....	67
<b>4.1.4. Ensaio de impacto</b> .....	68
<b>4.2. AMOSTRA DO AÇO SAE 4140 APENAS CEMENTADA</b> .....	69
<b>4.2.1. Análise química</b> .....	69
<b>4.2.2. Análise metalográfica</b> .....	71
<b>4.2.3. Análise de dureza</b> .....	72
<b>4.2.4. Ensaio de impacto</b> .....	74
<b>4.3. AMOSTRA DO AÇO SAE 4140 APÓS TRATAMENTO TÉRMICO DE TÊMPERA E REVENIDO</b> .....	77
<b>4.3.1. Análise química</b> .....	77
<b>4.3.2. Análise metalográfica</b> .....	79
<b>4.3.3. Análise da dureza</b> .....	83
<b>4.3.4. Análise de impacto</b> .....	85
<b>4.4. COMPARAÇÃO DA DUREZA VERSUS TENACIDADE</b> .....	90
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	<b>92</b>
<b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>94</b>
<b>7. REFERÊNCIAS</b> .....	<b>95</b>

## CAPÍTULO I

### 1. INTRODUÇÃO

O aço é um dos produtos mais versáteis do mundo, sendo utilizado desde embalagens de alimentos até na fabricação de grandes estruturas da construção civil ou naval. A vasta utilização desse material mundo afora se deve a sua versatilidade no que se referem as suas propriedades mecânicas, isso aliado ao seu baixo custo quando comparado a outros materiais metálicos. Há muitos séculos atrás o homem descobriu que com aquecimento e resfriamento podia modificar as propriedades mecânicas de um aço, isto é, torná-los mais duro, mais mole, mais maleável, etc. Mais tarde, descobriu também que a rapidez com que o aço era resfriado e a quantidade de carbono que possuía influía decisivamente nessas modificações <sup>[1]</sup>.

As operações de tratamento térmico consistem em ciclos de aquecimento e resfriamento controlado que tem por objetivo provocar alterações na microestrutura das ligas de aço e assim melhorar suas propriedades físicas, adequando estas a determinadas aplicações sem que seja necessário gerar qualquer mudança na sua composição química.

Os tratamentos termoquímicos são tratamentos térmicos mediante os quais se modifica, mais ou menos profundamente, a natureza de metal por difusão de um ou mais elementos químicos específicos, através de sua superfície. Esses tratamentos submetem as peças em condições de ambiente que promovem uma modificação parcial da composição química do material. Busca-se principalmente, o endurecimento superficial. O exemplo mais simples é quando temos a transformação da austenita em martensita, em aços baixo carbono sem liga, que sofreram processo de cementação com posterior têmpera. Devido ao aumento da dureza, ocorre o aumento da resistência mecânica e resistência ao desgaste até certa profundidade, ao mesmo tempo em que, o núcleo das peças cuja composição química não é afetada, mantém-se tenaz <sup>[2]</sup>.

O controle da temperatura e do tempo em diferentes tratamentos térmicos pode influenciar na sua estrutura, modificando assim as propriedades mecânicas, elétricas e magnéticas dos materiais <sup>[3]</sup>.

## 1.1- OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivos gerais

O objetivo geral desse trabalho é a análise da resistência ao impacto de um aço SAE 4140 submetido ao tratamento termoquímico de cementação e pós-tratamentos de têmpera e revenido, considerando a temperatura fixa e o tempo de tratamento variado.

### 1.1.2. Objetivos específicos

Realizar um estudo bibliográfico para reunir características e valores referentes ao aço 4140, para serem comparados com os resultados trabalhados em questão.

Analisar metalograficamente através das imagens feitas com o microscópio óptico as amostras tratadas e não tratadas termoquimicamente, para verificar a mudança da microestrutura.

Avaliar a resistência mecânica do aço SAE 4140 através dos ensaios de Impacto (Ensaio de Charpy) e Dureza das amostra tratadas e não tratadas termoquimicamente.

## CAPÍTULO II

### 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1. AÇOS

##### 2.1.1. Definição

O aço é uma liga de natureza relativamente complexa e sua definição não é simples, visto que, a rigor os aços comerciais não são ligas binárias. De fato, apesar dos seus principais elementos de liga serem o ferro e o carbono, eles contêm sempre outros elementos secundários, presentes devido aos processos de fabricação. Nestas condições, a definição adotada nesta obra é a seguinte:

Aço é liga ferro-carbono contendo geralmente 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais, resultantes dos processos de fabricação. Nessas condições será necessária, para se ter uma definição mais precisa considerar dois tipos fundamentais de aço. O limite inferior (0,008%) corresponde à máxima solubilidade de carbono no ferro à temperatura ambiente e o limite superior (2,11%) corresponde à máxima quantidade de carbono que se dissolve no ferro e ocorre a 1148 °C <sup>[3]</sup>.

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

O aço-carbono pode ser subdividido em:

- Aços de baixo teor de carbono, com C inferior a 0,25%;
- Aços de médio carbono, com C entre 0,25 e 0,60%;
- Aços de alto teor de carbono, com C acima de 0,60%.
- Aços-liga ou “aço-carbono que contém outros elementos de liga ou apresenta os elementos residuais em teores acima dos que são considerados normais”

<sup>[3]</sup>.

Os aços-liga podem ser 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% <sup>[3]</sup>.

Os aços possuem diversas aplicações tais como na fabricação de peça por fundição, trilhos, tubos, arames, fios, molas, chapas para estruturas em geral, entre outras aplicações. Geralmente a classificação dos aços é realizada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Sociedade dos 16 Engenheiros Automotivos (SAE), American Iron and Steel Institute (AISI) e American Society for Testing and Materials (ASTM).

Essas classificações especificam principalmente as composições químicas dos aços, os quais adotam as letras XX na posição correspondente ao teor de carbono após os algarismos indicativos do tipo de aço, como, por exemplo, 41, que são aços ligados para construção mecânica e deformação a frio. No caso de um aço SAE 4140, significam que é um aço com elementos adicionais de liga, ou seja, com adições de cromo e molibidênio em sua composição, além de ferro e carbono <sup>[2]</sup>.

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

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 e serviços (manutenção mecânica, elétrica, instrumentação e refratários), além de indústrias para utilização local dos produtos e co-produtos siderúrgicos (produção de tubos ou estruturas metálicas ou estampadas pré-montados, relaminações, fábricas de cimento, recuperação de escórias e lamas, termoelétricas) <sup>[6]</sup>.

Todas as propriedades físicas e mecânicas do aço são obtidas através de tratamentos térmicos ou trabalhos mecânicos pela modificação da sua microestrutura, variando conforme o teor dos componentes <sup>[5]</sup>.

### 2.1.2. Diagrama ferro-carbeto de ferro (Fe – Fe<sub>3</sub>C)

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.

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. 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 [2, 3, 7].

As fases, bem como os diagramas de fases podem ser divididas em duas categorias básicas [1, 3]:

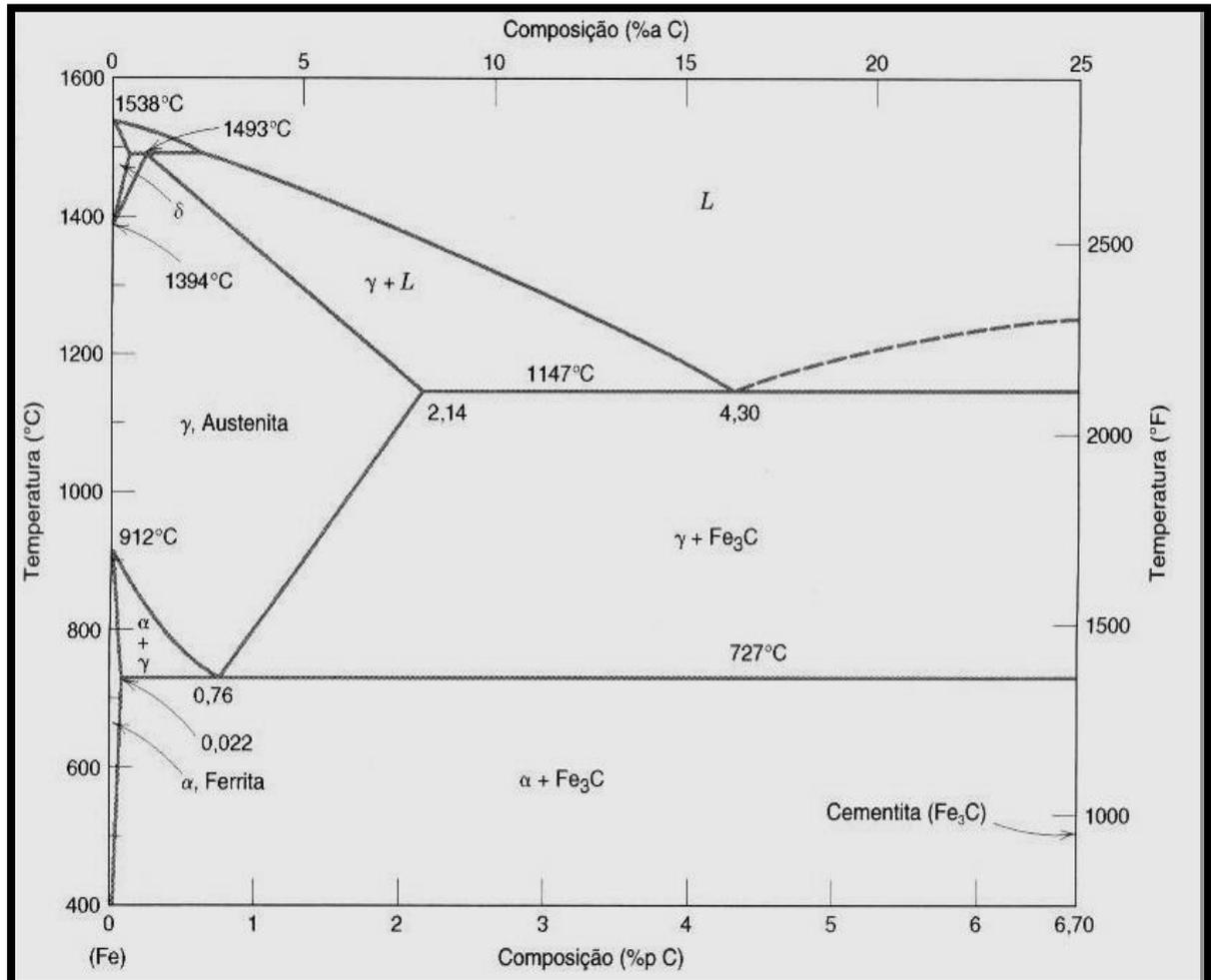
Fases metaestáveis, resultantes da transformação fora do equilíbrio termodinâmico, como, por exemplo, os diagramas de tempo, temperatura, transformação (TTT) muito utilizados para planejamento dos tratamentos térmicos dos aços.

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, emprega-se velocidades de aquecimento e resfriamento lentas o suficiente para que a movimentação dos átomos por difusão permita que o equilíbrio termodinâmico seja mantido.

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 do que a do Fe<sub>3</sub>C, desta forma o resultado é que, em aços comuns (e em ferros fundidos), a fase do Fe<sub>3</sub>C é metaestável, para todas as finalidades práticas, ele é estável com o tempo e relaciona-se à regra de Gibbs [7].

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 abaixo na figura 1.

**Figura 1** - Diagrama de Fase Ferro - Carbeto de ferro (Fe - Fe<sub>3</sub>C).



Fonte: [14]

Existem três pontos invariantes muito importantes no diagrama de fase: peritético, eutético e eutetóide [6, 14].

A reação peritética encontra-se a uma temperatura de 1493°C em torno de 0,17% de carbono, no resfriamento ocorre à seguinte transformação:



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



A reação eutetóide a uma temperatura de 727°C e 0,77% de carbono, no resfriamento teremos a seguinte transformação.



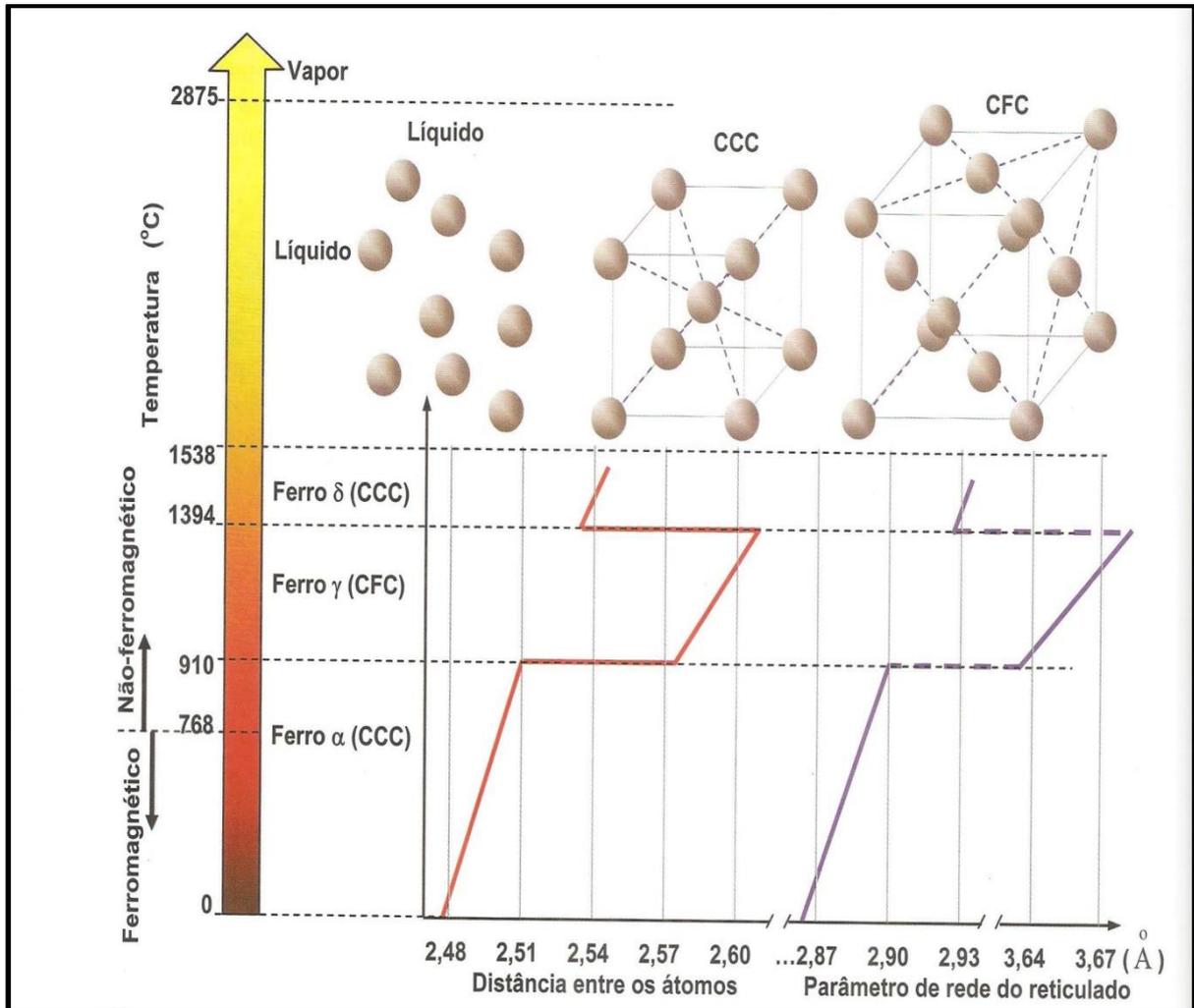
Outro aspecto importante do diagrama de fase está relacionado ao controle dos procedimentos dos tratamentos térmicos é o desenvolvimento da microestrutura, a microestrutura determinar as propriedades físicas e o comportamento do material [1].

O ferro puro ao ser aquecido passa por duas transformações até a sua total fusão, à temperatura ambiente (25°C), isento de carbono, apresenta-se até 912°C sob a forma alotrópica alfa ( $\alpha$ ) (ou ferrita) e acima de 912°C até 1354°C no estado alotrópico ( $\gamma$ ) (ou austenita). Essas formas alotrópicas se caracterizam por possuírem reticulados cristalinos diferentes para os átomos de ferro: o ferro  $\alpha$  possui reticulado cúbico de corpo centrado (CCC) e o ferro  $\gamma$  possui reticulado cúbico de face centrada (CFC) [3].

O carvão de ferro ou cementita é formado em uma concentração de 6,70%p de carbono. Dessa maneira podemos dividir o diagrama de fase em duas partes, sendo a primeira com a composição rica em ferro que vai até 6,70%p de carbono, a segunda parte para composição que varia de 6,70%p até 100%p de carbono (grafita pura) [1].

A figura 2 abaixo mostra as transformações alotrópicas do ferro.

Figura 2 - Transformações alotrópicas.



Fonte: [3]

- I. **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 dútil apresentando dureza e resistência mecânicas baixas; com a pureza comercialmente encontrada, sua resistência à tração é menor que 310 MPa. É um material ferromagnético a temperaturas inferiores a 770°C [3].

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 [2, 14].

- II. 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 estabilidade, a austenita é macia, sendo conseqüentemente bastante usada nos processos de fabricação. Na maioria das operações de laminação e forjamento de aços é conduzida a temperaturas iguais ou superiores a 1100 °C, quando então o ferro é cúbico de face centrada. A austenita não é ferromagnética qualquer que seja a temperatura <sup>[3]</sup>.

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 <sup>[2, 14]</sup>.

- III. Ferro –  $\delta$ :** Acima de 1394°C, 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 à faixa de temperatura, 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 <sup>[3]</sup>.

- IV. Carbetto 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 <sup>[3]</sup>.

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 <sup>[14]</sup>.

#### 2.1.2.1. Transformações de fases

Uma variedade de transformações de fases é importante no processamento de materiais, geralmente envolvendo alguma mudança na microestrutura. Para os objetivos dessa discussão, essas transformações estão divididas em três classificações. Em um grupo estão as transformações simples, dependentes de um processo de difusão, onde não existe qualquer alteração, quer no número quer na composição das fases presentes. Essas transformações incluem a solidificação de um metal puro, as transformações alotrópicas, e a recristalização e o crescimento do grão <sup>[1, 14]</sup>.

Num outro tipo de transformação que também depende da difusão, existe alguma alteração nas composições das fases e, com freqüência, também no número de fases presentes; geralmente, a microestrutura final consiste em duas fases. O terceiro tipo de transformação é independente da difusão e na qual se produz uma fase metaestável <sup>[9]</sup>.

Com as transformações de fases, normalmente pelo menos uma nova fase é formada, a qual possui características físico-químicas diferentes e /ou uma estrutura diferente daquela da fase que a originou. Além disso, a maioria das transformações de fases não ocorre instantaneamente. Em vez disso, elas começam pela a formação de numerosas partículas pequenas da nova fase, as quais aumentam em tamanho até que a transformação tenha terminado. O progresso de uma

transformação de fases pode ser dividido em dois estágios distintos: **nucleação** e **crescimento** [7, 13].

A nucleação envolve o surgimento de partículas, ou núcleos, muito pequeno da nova fase (que consistem, com freqüência, em apenas umas poucas centenas de átomos), que são capazes de crescer. Durante o estágio de crescimento, esses núcleos aumentam em tamanho, o que resulta no desaparecimento de parte ou de toda fase original. A transformação atinge o seu final se for permitido que o crescimento dessas partículas da nova fase prossiga até que uma fração de equilíbrio seja alcançada [13].

#### 2.1.2.2. Desenvolvimento da microestrutura

O desenvolvimento de um conjunto de características mecânicas desejáveis para um material resulta, com freqüência, de uma transformação de fases, a qual é forjada por um tratamento térmico. As dependências em relação ao tempo e à temperatura de algumas transformações de fases são representadas de uma maneira conveniente em diagramas de fases modificados. É importante saber como usar esses diagramas a fim de se projetar um tratamento térmico para uma dada liga que produzirá as propriedades mecânicas desejadas à temperatura ambiente [2].

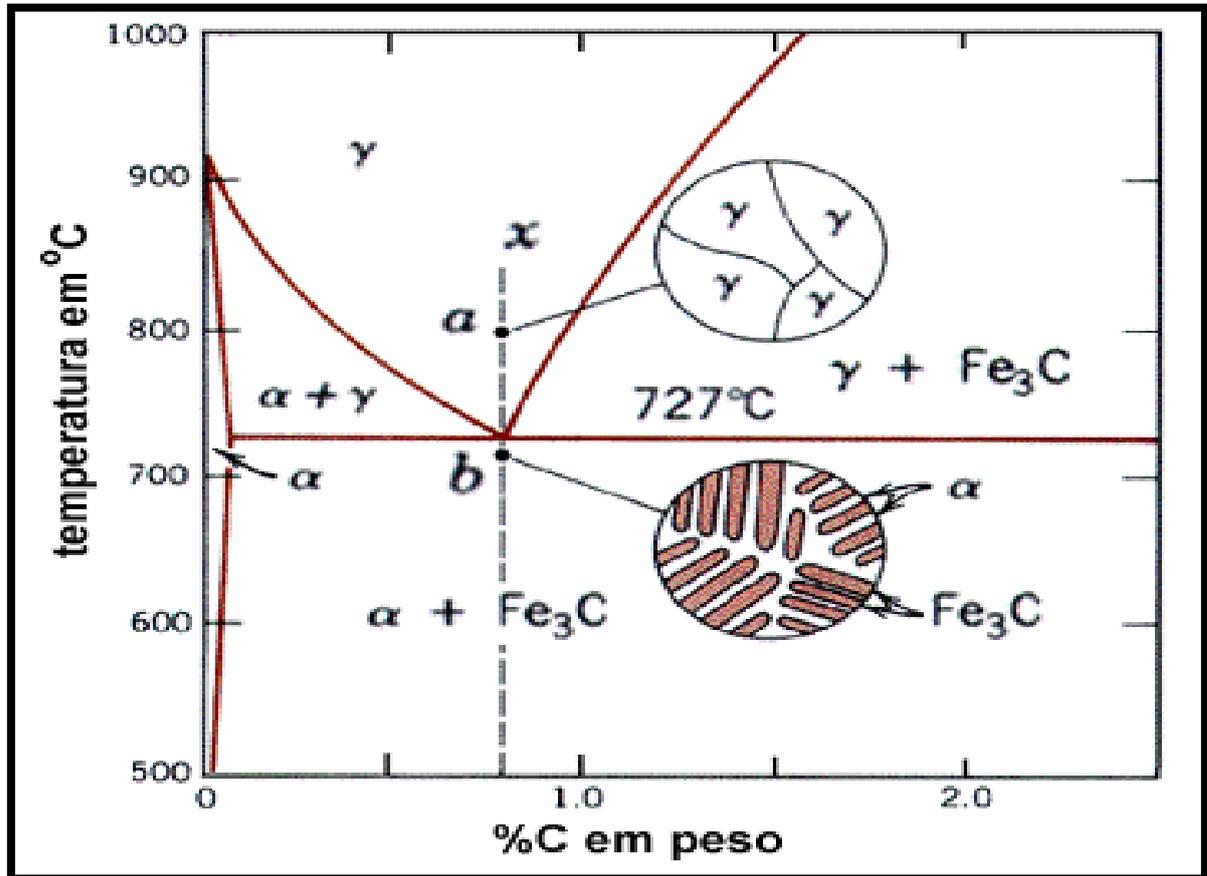
Uma das características importante do diagrama de fase  $Fe_3C$  é o desenvolvimento da microestrutura, devido à mesma determinar as propriedades físicas e o comportamento do material. A formação da microestrutura depende tanto do teor de carbono quanto do tratamento térmico realizado, condições de resfriamento. Neste caso, a microestrutura das ligas de aço será formada com resfriamento lento e em condições de equilíbrio [14].

Existem várias microestruturas que podem ser produzidas em aços, iremos abordar as microestruturas de um aço eutetóide.

A reação eutetóide, em aços, produz uma microestrutura característica chamada “perlita”. A perlita não é uma fase e sim uma mistura de duas fases, ferrita e cementita, que ocorrem sob a forma de lamelas paralelas. A ferrita tem estrutura (CCC) e, em comparação com austenita, é menos compacta, apresentando interstícios tetraédricos menores e, conseqüentemente, tendo menor capacidade de dissolver carbono. O carbono, que é rejeitado pela formação da ferrita, dá origem à

cementita. A cementita é uma fase rica em carbono, de composição  $\text{Fe}_3\text{C}$  [1]. A figura 3 mostra a região eutetóide do diagrama.

**Figura 3** - Região eutetóide do diagrama  $\text{Fe}_3\text{C}$  e microestrutura esquemática de um aço eutetóide em condições de resfriamento.



Fonte: [Adaptada; 9]

A figura 3 mostra esquematicamente processo de resfriamento lento em liga de ferro-carbono com composição eutetóide. Formando uma microestrutura acima da temperatura eutetóide (ponto "a") e outra microestrutura abaixo da temperatura eutetóide (ponto "b"), conhecida como perlita [3].

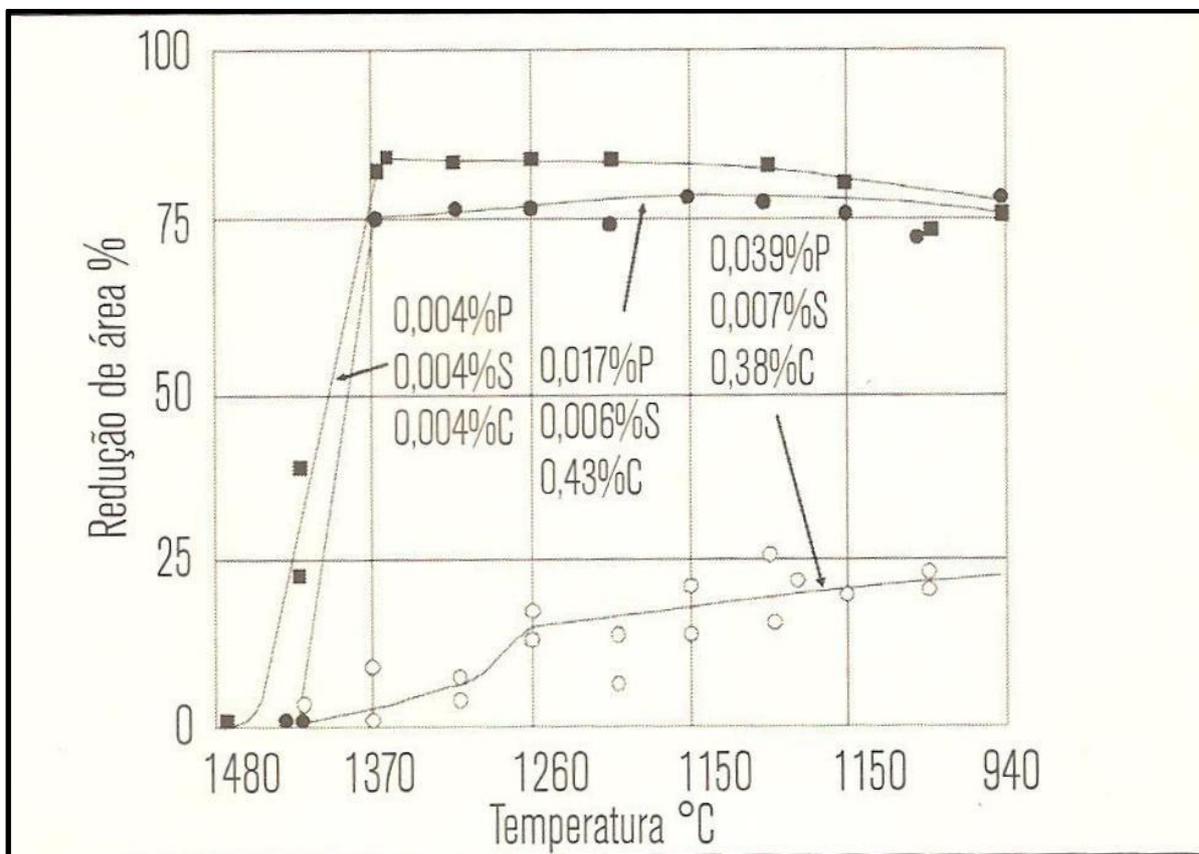
### 2.1.3. Efeito das impurezas

Os aços comuns contêm sempre, além do carbono, pequenos teores de fósforo, enxofre, manganês e silício, além de traços de outros eventuais elementos. Essas impurezas podem combinar-se entre si ou então com o ferro ou o carbono, apresentando-se como inclusões ou soluções sólidas.

#### 2.1.3.1. Fósforo

Quando o teor desse elemento ultrapassa certos limites, constitui esse elemento um dos mais nocivos que aparece nos aços, devido à fragilidade que este proporciona em temperatura ambiente. Além da fragilidade antes referida, o fósforo aumenta um pouco a dureza e a resistência mecânica e diminui a ductilidade. O teor limite varia conforme a aplicação, sendo menor em aplicações que necessitem tenacidade a frio <sup>[6]</sup>.

**Figura 4 - Efeito do fósforo na ductilidade do aço.**



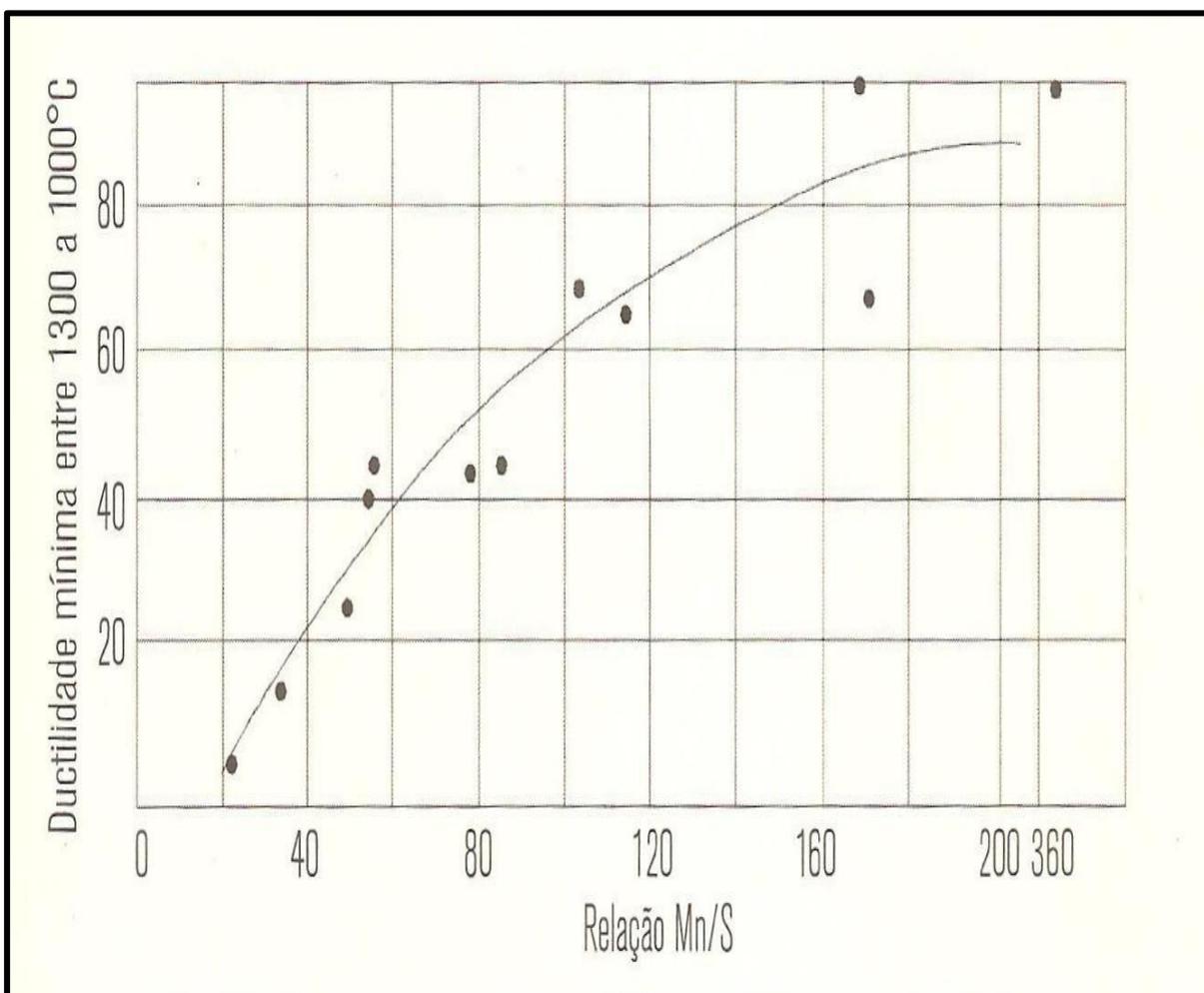
Fonte: [13]

### 2.1.3.2. Enxofre

As propriedades mais afetadas pela presença do enxofre são a resistência à tração, a ductilidade e a tenacidade, mas seus efeitos são mínimos em aços com baixo teor de carbono e, vale ressaltar, quando seu teor for menor que 0,1%.

Em faixas de temperaturas de 800°C 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<sup>[6]</sup>.

**Figura 5** - Influência da relação Mn/S na ductilidade do aço.



Fonte: [13]

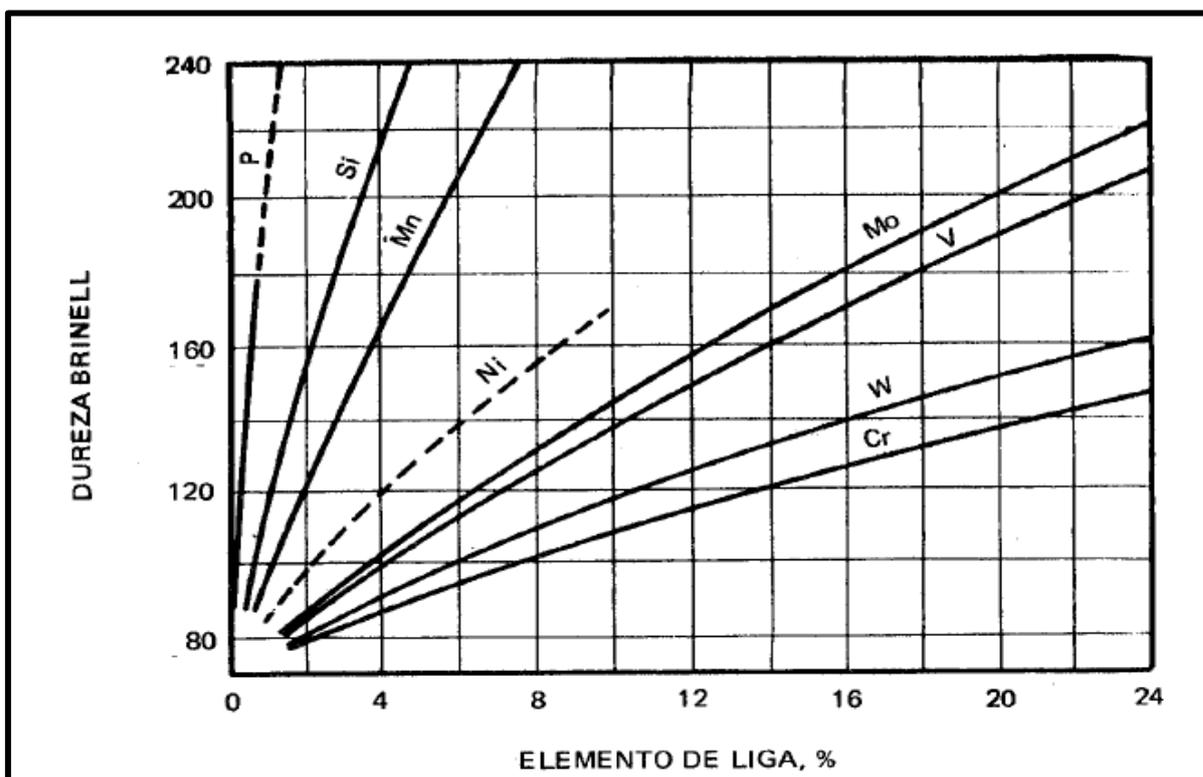
Outros elementos podem nocivos ao aço, como manganês e silício, não afetam tanto as propriedades do aço. Tanto um como o outro, assim como o fósforo, também se dissolvem na ferrita, aumentando a dureza e resistência mecânica [5].

#### 2.1.4. Efeitos dos elementos de liga

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.

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  $Fe_3C$  [3].

**Figura 6** - Ação relativa na dureza do aço de alguns elementos de liga.



Fonte: [6]

A figura 6 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 <sup>[Autor]</sup>.

### 2.1.5. 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 (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 constitui o mínimo irrelevante <sup>[7, 9]</sup>.

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 a 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 <sup>[9]</sup>.

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

NÚMERO SAE OU AISI	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO
10xx	Aços ao carbono (comuns)
11xx	Aços ao carbono (ressulfurados)
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%)

Fonte: [Autor]

### 2.1.6. Aço sae 4140

O aço 4140 é um aço para beneficiamento com temperabilidade média, ligado ao cromo e molibdênio, utilizado na fabricação de diferentes componentes mecânicos onde se deseja uma boa combinação de resistência mecânica média e resistência à fratura. Também possui elevada resistência à fadiga.

É utilizado em componentes para sistemas mecânicos de uso geral onde o uso do aço SAE 1045 não se aplica por consequência de sua melhor capacidade de endurecimento em maiores seções transversal, resistência à fadiga e à fratura.

Utilizado em rolamentos, cilindros, engrenagens, eixos hidráulicos, eixos furados, anéis, porcas e parafusos, tirantes, etc.

**Tabela 2** – Composição química do aço SAE 4140.

(%) C	(%) Si	(%) Mn	(%) Cr	(%) Mo
0,38 – 0,43	0,10 – 0,35	0,75 – 1,00	0,80 – 1,10	0,15 – 0,25

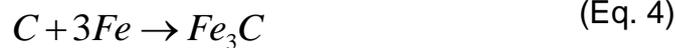
Fonte: [Autor]

## 2.2. TRATAMENTO TERMOQUÍMICO

### 2.2.1. Cementação

Consiste na introdução de carbono na superfície do aço, de modo que este, depois de temperado, apresente uma superfície mais dura. Para se produzir uma combinação de uma superfície dura com núcleo tenaz, deve-se partir de um aço com baixo carbono ( $C < 0,30\%$ ) e aquecê-lo, geralmente, entre  $815^{\circ}\text{C}$  e  $950^{\circ}\text{C}$  <sup>[1]</sup>.

Na cementação (ou carborização), o elemento fundamental é o carbono, na forma de carvão, monóxido de carbono ou contido em banhos de cianetos. Os aços a serem cementados devem possuir carbono baixo, de modo que, quando aquecidos a elevadas temperaturas (de austenização), na presença de um meio carbonetante, o carbono desse meio reage com o ferro do aço, de acordo com a reação simples <sup>[5]</sup>:



Desse modo a superfície do aço fica enriquecida de carbono, até a profundidade que pode ser perfeitamente preestabelecida, permitindo, assim, a sua têmpera posterior, para aumento superficial da dureza e da resistência ao desgaste [5].

A migração dos átomos de carbono da superfície para o interior da peça acontece quando a solubilidade do carbono na estrutura cristalina da austenita é elevada, assim, os átomos de carbono disponíveis na superfície difundem-se rapidamente em direção ao interior, formando uma camada superficial rica em carbono [Autor].

A espessura desta camada superficial depende do tempo de permanência à temperatura de cementação e do carbono disponível na superfície, e pode ser prevista com base na solução da segunda lei de Fick:

$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_0} = \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde  $C_s$  é a concentração de carbono disponível na superfície;  $C_x$  é a concentração de carbono na peça a uma profundidade ( $x$ ) da superfície, após um tempo ( $t$ ) de permanência à temperatura de cementação;  $C_0$  é a concentração inicial de carbono no aço e ( $\text{erf}$ ) é a função erro.  $D$  é a difusividade do carbono:  $D = D_0 \cdot \exp(-Q/RT)$ , onde  $D_0$  é o termo pré-exponencial;  $Q$  é a energia de ativação para a difusão;  $R$  é a constante dos gases perfeitos ( $8,314\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) e  $T$  a temperatura de cementação [3].

A cementação pode ser feita por via: Sólida, Gasosa, Líquida, Vácuo e Plasma. A cementação sólida é o processo mais simples, embora não proporcione o melhor controle da camada cementada dentro de tolerâncias rigorosas, nem do teor de carbono superficial ou do gradiente de carbono. É, contudo, ainda muito empregado, por não exigir equipamento sofisticado, nem atmosfera controlada especial e por ser eficiente e econômico para pequenos lotes de peças ou para peças de grandes dimensões. Pelo fato de não ser fácil a têmpera imediata, o

resfriamento lento após a cementação, é vantajoso para as peças antes da têmpera [2].

A faixa de temperaturas na cementação sólida é, geralmente, de 815°C a 950°C, podendo chegar até a temperatura entre 1000°C e 1100°C. Pode obter uma camada de espessura superior a 2 mm.

É preciso notar que a geração de quantidades apreciáveis de CO<sub>2</sub> se dá a temperaturas elevadas, de modo que se deve evitar, após a cementação, resfriamento muito lento até mais ou menos 650°C, pois havendo formação de quantidade apreciável de CO<sub>2</sub>, origina-se uma casca mole.

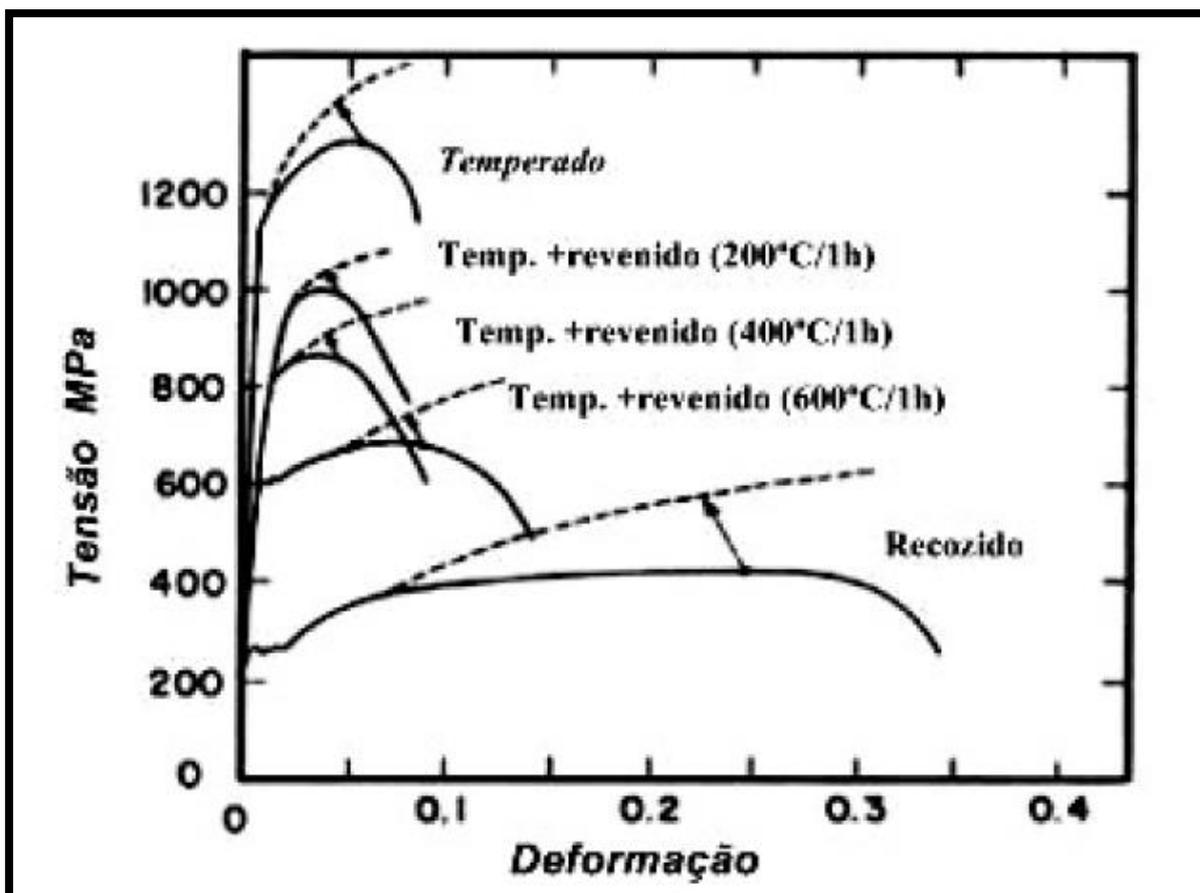
As desvantagens do processo relacionam-se com os fatos de não proporcionar um controle rigoroso da espessura da camada cementada, não ser recomendável para obtenção de camadas finas, não ser adequado para têmpera direta, exigir tempo mais longo de operação (devido ao peso das caixas e da mistura carburizante que reduzem as velocidades de aquecimento e resfriamento) então ser tão limpo quanto os outros processos de cementação [2].

### 2.3. TRATAMENTO TÉRMICO DOS AÇOS

Os tratamentos térmicos empregados em metais ou ligas metálicas são definidos como qualquer conjunto de operações de aquecimento e resfriamento, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, com o objetivo de alterar suas propriedades ou conferir-lhes características pré-determinadas.

Tratamento térmico pode ser descrito como um ciclo controlado de aquecimento e resfriamento do metal, objetivando a modificação de sua microestrutura e conseqüentemente a mudança nas propriedades mecânicas do mesmo [Adaptado; 1].

Figura 7 - Efeito de diferentes tratamentos térmicos sobre a resistência a tração.



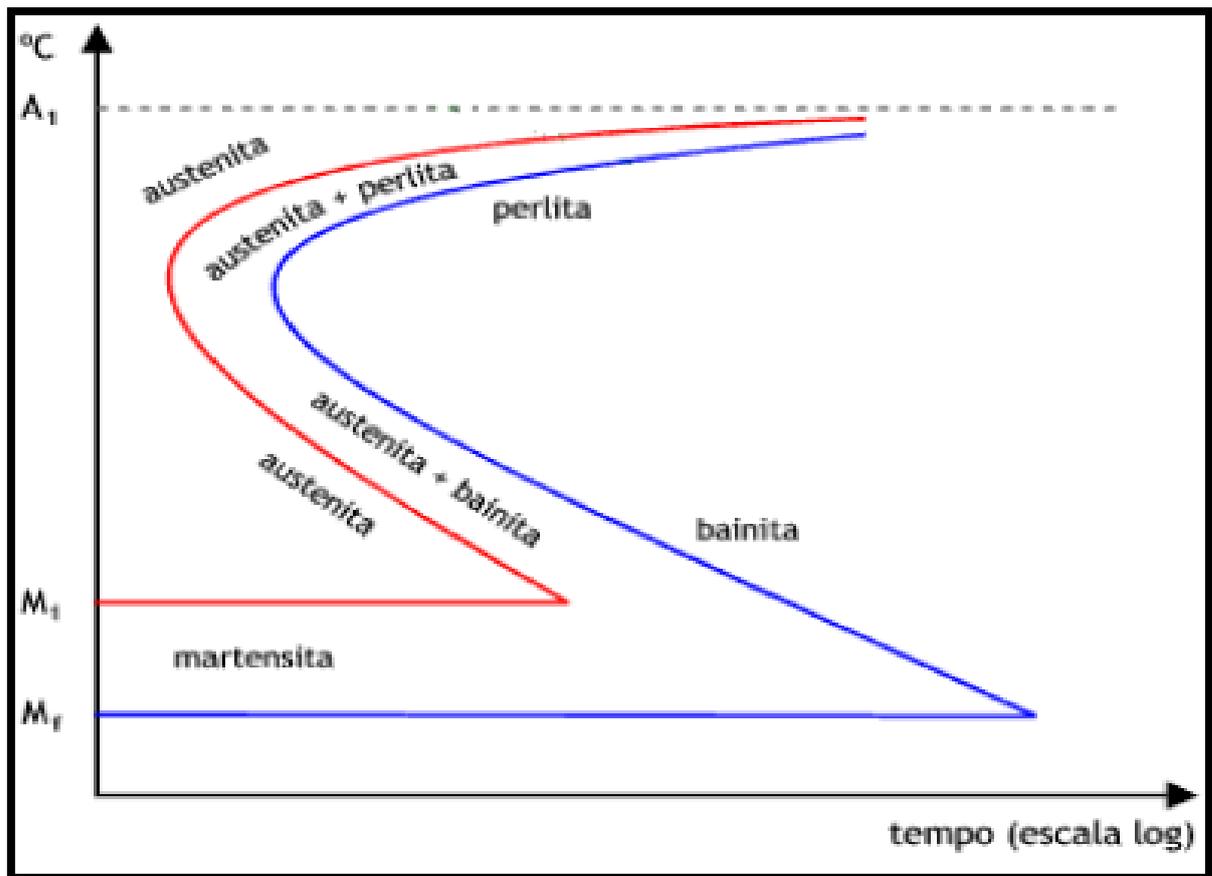
Fonte: [13]

Os principais objetivos dos tratamentos térmicos dos aços envolvem:

- Remoção de tensões residuais decorrentes de processos mecânicos de conformação ou térmicos;
- Refino da microestrutura (diminuição do tamanho de grão);
- Aumento ou diminuição de dureza;
- Aumento ou diminuição da resistência mecânica;
- Aumento da ductilidade.

As operações de tratamento térmico dependem principalmente do processo de resfriamento do material, através do tempo em que esse resfriamento leva para ocorrer resulta em diferentes transformações microestruturais. Para compreender melhor os processos que ocorrem no tratamento térmico utiliza-se o diagrama denominado TTT, que relaciona o tempo, a temperatura e a transformação que ocorre em decorrência dessas grandezas.

Figura 8 - Diagrama TTT com as principais zonas de transformação.



Fonte: [5]

### 2.3.1. Têmpera

Uma das características mais importantes dos aços como materiais de construção mecânica é a possibilidade de desenvolver ótimas combinações de resistências e tenacidade (medida pela resistência ao impacto). A estrutura que classicamente permite tais combinações é a estrutura martensítica revenida <sup>[1]</sup>.

A têmpera consiste em resfriar o aço, após austenização, a uma velocidade suficientemente rápida para evitar as transformações perlíticas e bainíticas na peça em questão. Deste modo, obtém-se estrutura metaestável martensítica <sup>[1]</sup>.

Os meios mais comuns de resfriamento são líquidos ou gasosos. No caso dos meios líquidos, os mais comumente usados são <sup>[3]</sup>:

- Água (alta);
- Água contendo sal ou aditivos cáusticos (alta);
- Óleo, que pode conter uma variedade de aditivos (moderada);

- Soluções aquosas de polímeros (moderada).

Os meios gasosos mais comuns, além do ar (agressividade baixa), são gases inertes, como nitrogênio, hélio e argônio <sup>[3]</sup>.

Deve-se ainda observar que, aumentando-se o teor de carbono do aço, diminui-se a temperatura para início e fim da formação da martensita. Também a dureza martensítica aumenta com o teor de carbono. Em vista disso, os aços carbono para têmpera apresentam um teor de carbono maior que 0,3%, pois abaixo deste teor o efeito endurecedor provocado pela têmpera seria muito pequeno <sup>[1]</sup>.

Como na têmpera a microestrutura final desejada é a martensita, os objetivos dessa operação, sob o ponto de vista de propriedades mecânicas, são aumento da dureza do aço e da sua resistência à tração. Na realidade, o aumento da dureza deve ocorrer até certa profundidade <sup>[3]</sup>.

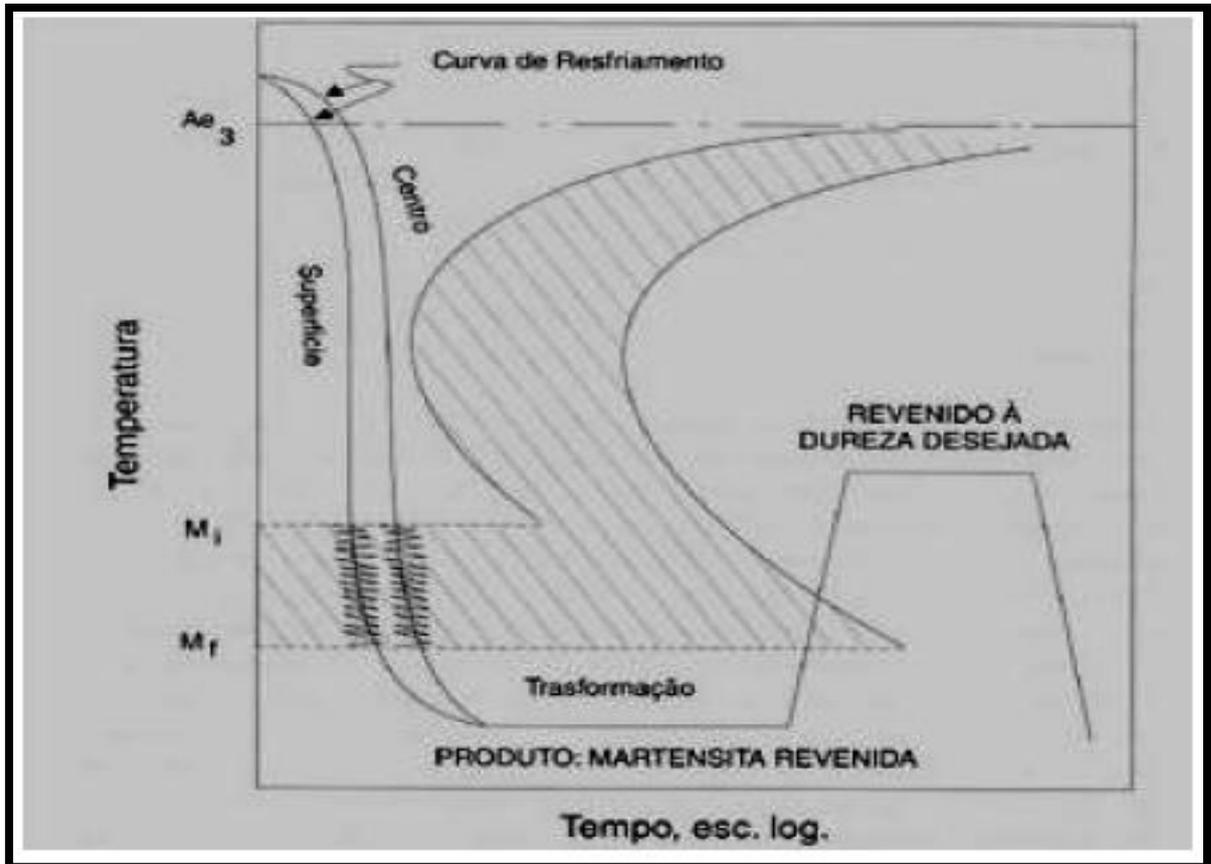
Resultam também da têmpera, redução da ductilidade (baixos valores de alongamento e estrição), da tenacidade e o aparecimento de apreciáveis tensões internas, que podem se não bem controladas, ocasionarem deformação, empenamento e fissuração <sup>[3]</sup>.

Para que a operação de têmpera seja bem sucedida, vários fatores devem ser levados em conta. Inicialmente, a velocidade de resfriamento deve ser tal que impeça a transformação da austenita nas temperaturas mais elevadas, em qualquer parte da peça que se deseja endurecer. De fato, as transformações da austenita nas altas temperaturas podem dar como resultados estruturas mistas, as quais ocasionam o aparecimento de pontos moles além de conferirem ao aço baixos valores para o limite de escoamento e para resistência ao choque.

Portanto, a secção das peças constitui outro fator importante porque pode determinar diferenças de esfriamento entre a superfície e o centro. Em peças pequenas ou de pequena espessura, essa diferença é desprezível. O mesmo, contudo, não se dá com peças de grandes dimensões, no centro das quais a velocidade de esfriamento é menor do que na superfície, resultando estruturas de transformação mistas, a não ser que o teor de elementos de liga do aço seja suficiente para impedir essa transformação e produzir somente a estrutura martensítica <sup>[2]</sup>.

Às vezes, por outro lado, é conveniente um núcleo mais mole e, então, escolhe-se um aço e uma velocidade de esfriamento que produzam superfície dura e núcleo naquelas condições <sup>[3]</sup>.

**Figura 9** - Representação esquemática do tratamento térmico de têmpera.



Fonte: [2]

### 2.3.3. Revenido

O revenido é o tratamento térmico que normalmente sempre acompanha a têmpera, pois elimina a maioria dos inconvenientes produzidos por esta, além de aliviar ou remover tensões internas, corrige as excessivas dureza e fragilidade do material, aumentando sua ductilidade e resistência ao choque <sup>[2]</sup>.

Para atingir valores adequados de resistência mecânica e tenacidade, deve-se, logo após a têmpera, proceder ao revenimento. Este tratamento consiste em aquecer uniformemente até uma temperatura abaixo da temperatura de

austenização, mantendo o aço nesta temperatura por tempo suficiente para equalização de temperatura e obtenção das propriedades desejadas.

Conforme as temperaturas de revenido verificam-se as seguintes transformações [3, 5, 7, 13, 14]:

Entre 25°C e 100°C ocorre segregação ou uma redistribuição do carbono em direção a discordâncias; essa pequena precipitação localizada do carbono pouco afeta a dureza. O fenômeno é predominante em aços de alto carbono;

Entre 100°C e 250°C - às vezes chamado 1º estágio do revenido – ocorre precipitação de carboneto de ferro do tipo épsilon, de fórmula  $Fe_{2-3}C$ , e reticulado hexagonal; este carboneto pode estar ausente em aços de baixo carbono e de baixo teor em ligas; a dureza Rockwell começa a cair, podendo chegar a 60;

Entre 200°C e 300°C – às vezes chamado de 2º estágio – ocorre transformação de austenita em ferrita e cementita em aços-carbono de médio e alto teor de carbono; a dureza Rockwell continua a cair;

Entre 250°C e 350°C – às vezes chamado de 3º estágio do revenido – forma-se um carboneto metaestável, de fórmula  $Fe_5C_2$ ; quando essa transformação se verifica em aços de alto carbono, a estrutura visível ao microscópio é uma massa escura, que era chamada de “troostita”, denominação não mais utilizada; a dureza Rockwell continua caindo, podendo atingir, valores pouco superior a 50;

Entre 400°C e 600°C ocorre uma recuperação da subestrutura de discordância; os aglomerados de  $Fe_3C$  passam a uma forma esferoidal, ficando mantida uma estrutura de ferrita fina acicular; a dureza Rockwell cai para valores variando de 45 a 25;

Entre 500°C e 600°C, somente nos aços contendo Ti, Cr, Mo, V, Nb, ou W, há precipitação de carbonetos de liga, a transformação é chamada de “endurecimento secundário” ou 4º estágio do revenido.

Finalmente, entre 600°C e 700°C ocorrem recristalização e crescimento de grão; a cementita precipitada apresenta a forma nitidamente esferoidal; a ferrita apresenta forma aqui-axial; a estrutura é frequentemente chamada “esferoidal” e caracteriza-se por ser muito tenaz e de baixa dureza, variando de 5 a 20 Rockwell.

Pelo que acaba ser exposto, percebe-se que a temperatura de revenido pode ser escolhida de acordo com a combinação de propriedades mecânicas que se deseja no aço temperado [3].

## 2.4. ANÁLISE METALOGRÁFICA

Existem dois tipos de análise metalográfica, a análise macro e a micrográfica, sendo que a primeira é uma análise a olho nu, e a segunda é uma análise com a utilização do microscópio, neste trabalho iremos abordar a análise micrográfica <sup>[12]</sup>.

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 <sup>[11]</sup>.

### 2.4.1. 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), apenas a superfície do material é submetida à observação e o microscópio óptico deve ser usado no modo de reflexão.

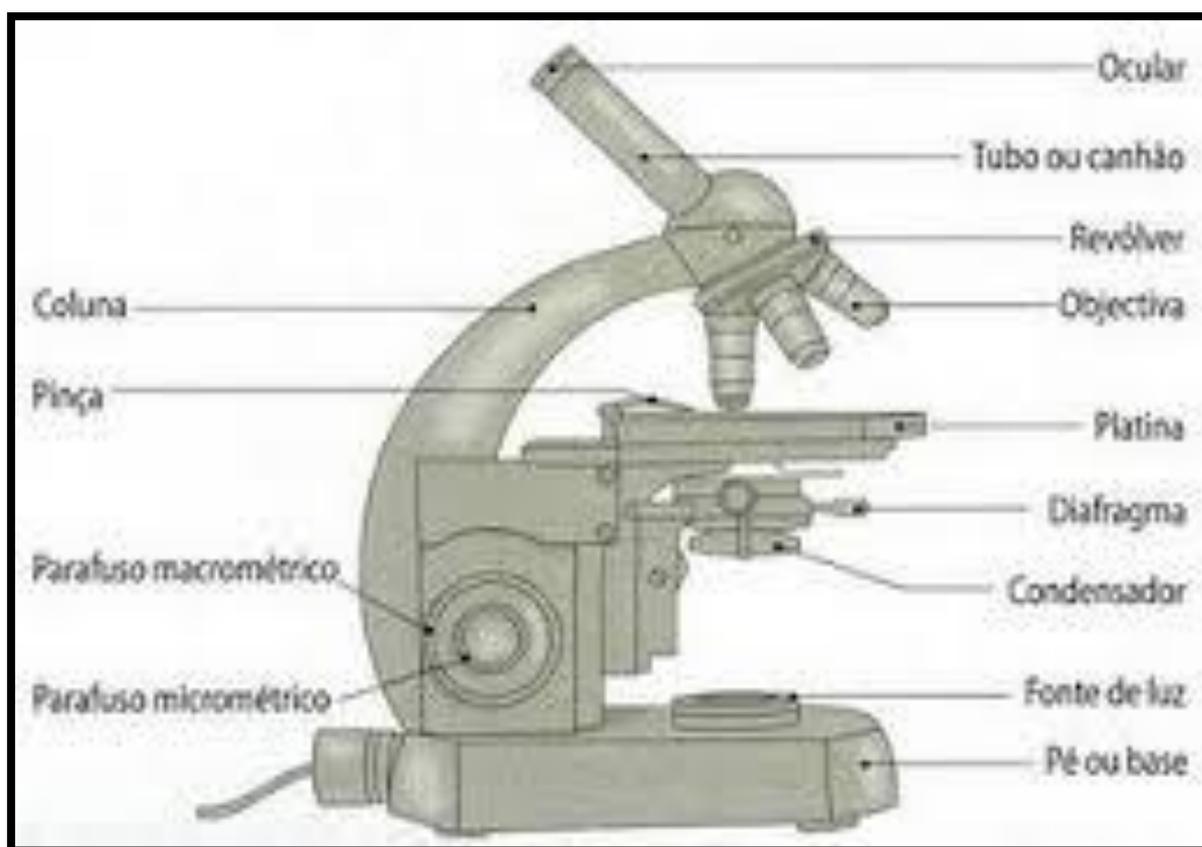
Os contrastes na imagem produzida resultam das diferenças na refletividade das várias regiões da microestrutura. As investigações desse tipo são chamadas freqüentemente de metalográfica, uma vez que os metais foram os primeiros materiais a ser examinados com o emprego dessa técnica <sup>[12]</sup>.

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 <sup>[3]</sup>.

A figura 10 mostra a representação esquemática de um microscópio óptico.

**Figura 10** – Representação esquemática de um microscópio óptico.



Fonte: [11]

## 2.5. PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas dos materiais são verificadas pela realização de experimentos de laboratório cuidadosamente projetados, que reproduzem o mais fielmente possível as condições de serviço. Fatores que devem ser considerados incluem a natureza da carga aplicada e a duração de sua aplicação, assim como as condições ambientais. A carga pode ser de tração, de compressão ou de cisalhamento, e a sua magnitude pode ser constante ao longo do tempo ou variar continuamente. O tempo de aplicação pode ser de apenas uma fração de um segundo ou se estender por um período de muitos anos. A temperatura de operação também pode ser um fator importante <sup>[2]</sup>.

Os ensaios mecânicos permitem a determinação de propriedades mecânicas que se referem ao comportamento do material quando sob a ação de esforços e que são expressas em função de tensões e/ou deformações. Tensões representam a

resposta interna aos esforços externos que atuam sobre uma determinada área em um corpo. Entre as propriedades mecânicas dos materiais existentes, podemos citar: resistência, elasticidade, plasticidade, tenacidade, resiliência, ductilidade, entre outras <sup>[3, 4]</sup>.

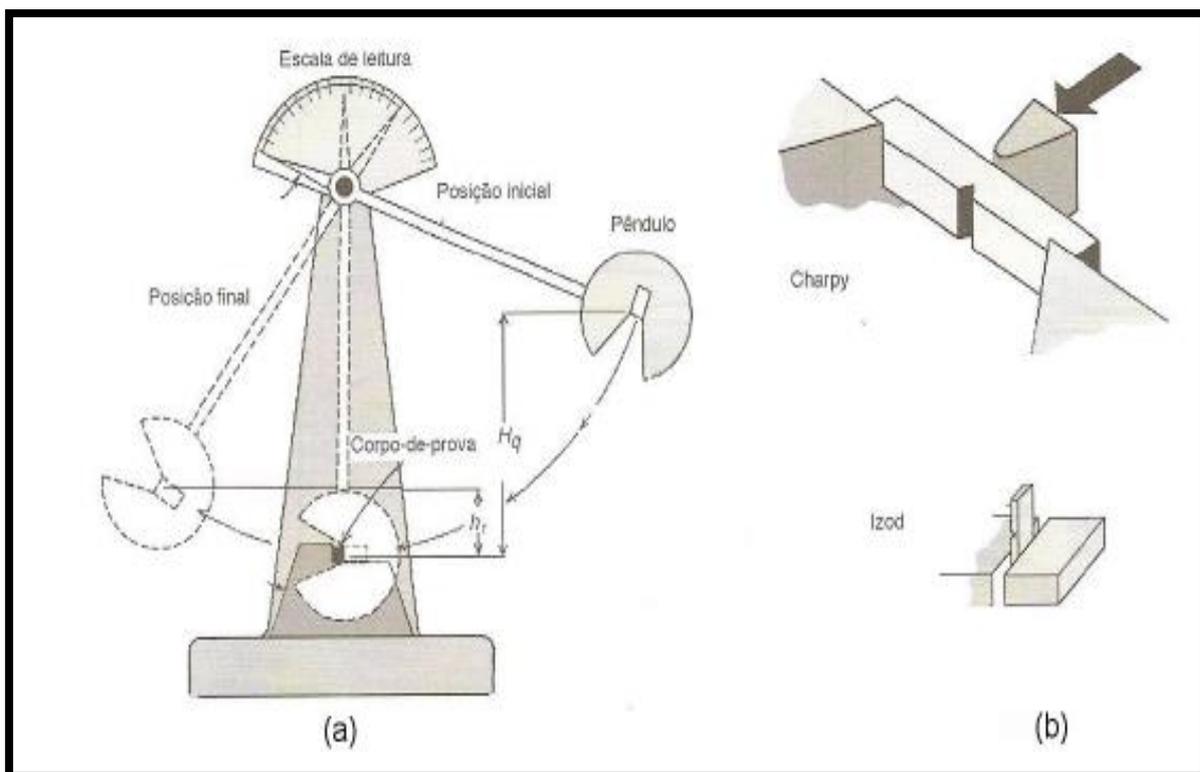
### **2.5.1. Ensaio de impacto**

O comportamento dúctil-frágil dos materiais pode ser mais amplamente caracterizado por ensaios de impacto. A carga nesses ensaios é aplicada na forma de esforços por choque (dinâmicos), sendo o impacto obtido por meio da queda de um martetele ou pêndulo, de uma altura determinada, sobre a peça a examinar. As massas utilizadas no ensaio são intercambiáveis, possuem diferentes pesos e podem cair de alturas variáveis. Os ensaios mais conhecidos são denominados Charpy e Izod, dependendo da configuração geométrica do entalhe e do modo de fixação do corpo-de-prova na máquina <sup>[4]</sup>.

O ensaio de impacto é um ensaio dinâmico empregado para análise de fratura frágil de materiais. O resultado é simplesmente representado por uma média de energia absorvida pelo corpo-de-prova, não fornecendo indicações seguras sobre o comportamento de toda uma estrutura em condições de serviço. Entretanto, permite a observação de diferenças de comportamento entre materiais que não são observadas em um ensaio de tração <sup>[8]</sup>.

Como já vimos, dois tipos padronizados de ensaios de impacto são: Charpy e Izod. Em ambos os casos, o corpo-de-prova tem o formato de uma barra de seção transversal quadrada, na qual é usinado um entalhe em forma de V. o equipamento de ensaio, juntamente com os tipos de corpo-de-prova, é apresentado na figura 11 <sup>[4]</sup>.

**Figura 11** - Representação esquemática do ensaio de impacto.



Fonte: [8]

A carga é aplicada pelo impacto de um martelo pendular, que é liberado a partir de uma posição padronizada e uma altura fixada ( $H_q$ ). Após o pêndulo ser liberado, sua ponta choca-se e fratura o corpo-de-prova no entalhe, que atua como um concentrador de tensões. O pêndulo continua seu movimento após o choque, até uma altura ( $h_r$ ) menor que a altura liberação do pêndulo ( $H_q$ ). A energia absorvida no impacto é determinada a partir da diferença entre  $H_q$  e  $h_r$ , ambas as medidas na escala do equipamento [4].

Os requisitos essenciais para a realização do ensaio são: corpo-de-prova padronizado, suporte rígido no qual o corpo-de-prova é apoiado ou engastado, pêndulo com massa conhecida solto de uma altura suficiente para fraturar totalmente o material e um dispositivo de escala para medir as alturas antes e depois do impacto do pêndulo.

As diferenças fundamentais entre o Charpy e o Izod residem na forma em que o corpo-de-prova é montado (horizontal ou vertical), conforme mostra a figura 11 (b), e na face do entalhe, localizada ou não na região de impacto. Variáveis como o tamanho e a forma do corpo-de-prova e a profundidade e configurações do entalhe

influenciam os resultados dos testes. As energias de impacto são interesse no aspecto comparativo entre diferentes materiais. Entretanto, seus valores absolutos isoladamente não representam informação quantitativa das características dos materiais.

A principal função dos ensaios Charpy e Izod consiste em determinar se um material apresenta ou não uma transição dúctil-frágil com o decréscimo da temperatura e, caso presente, em que faixa de temperaturas ocorre o fenômeno. A transição dúctil-frágil é relacionada com a temperatura pela energia de impacto medida no ensaio <sup>[4]</sup>.

Em temperaturas mais elevadas, a energia de impacto é relativamente alta e é compatível com um modo dúctil de fratura. À medida que a temperatura diminui, a energia de impacto cai subitamente ao longo de um intervalo de temperaturas relativamente pequeno, abaixo do qual a energia de impacto apresenta um valor baixo e essencialmente constante; nesse intervalo, o modo de fratura é frágil <sup>[8]</sup>.

#### **2.4.2. Ensaio de dureza**

A dureza é uma propriedade mecânica cujo conceito se segue à resistência que um material, quando pressionado por outro material ou por marcadores padronizados, apresenta ao risco ou à formação de uma marca permanente. Os métodos mais aplicados em engenharia se utilizam de penetradores com formato padronizado e que são pressionados na superfície do material sob condições específicas de pré-carga e carga, causando inicialmente deformação elástica e em seguida deformação plástica. A área da marca superficial formada ou a sua profundidade são medidas e correlacionada com um valor numérico que representa a dureza do material. Esta correlação é baseada na tensão de que o penetrador necessita para vencer a resistência da superfície do material <sup>[2, 4]</sup>.

A dureza de um material depende diretamente das forças de ligação entre átomos, íons ou moléculas, assim como da resistência mecânica. Nos sólidos moleculares, como os plásticos, as forças atuantes entre as moléculas (forças de Van der Waals) são baixas, e eles são relativamente macios. Os sólidos metálicos e iônicos, devido à natureza mais intensa das forças de ligação, são mais duros, enquanto os sólidos de ligação covalente são os materiais conhecidos de maior dureza. A dureza dos metais pode também ser aumentada por tratamentos

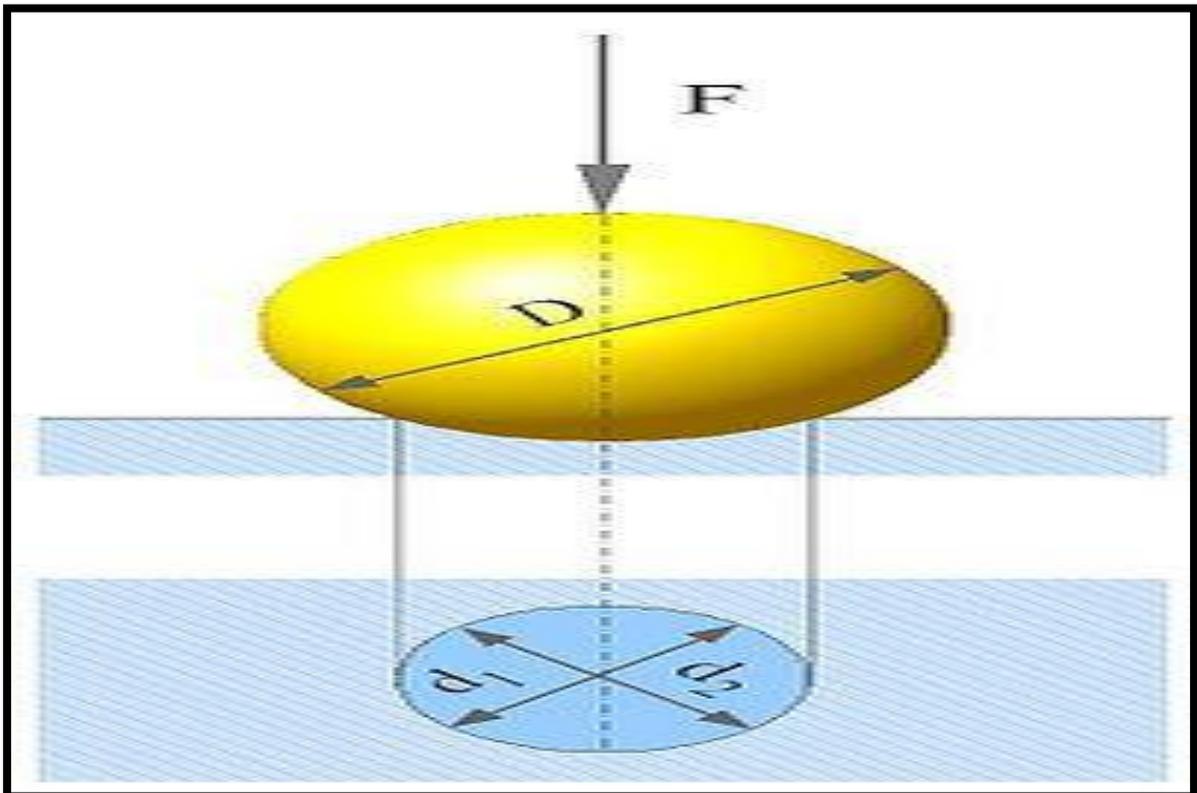
especiais, como adição de soluto trabalha a frio, endurecimento por precipitação ou tratamento térmico [8].

Na dureza por penetração, podemos destacar a dureza Brinell, Rockwell e Vickers. O ensaio de dureza Brinell consiste em comprimir lentamente uma esfera, de aço temperado ou de carbeto de tungstênio, de diâmetro ( $D$ ), sobre uma superfície plana, polida e limpa de um metal, por meio de uma carga ( $F$ ), (a carga aplicada varia entre 500 e 3000 kgf), durante um tempo ( $t$ ), produzindo uma calota esférica de diâmetro ( $d$ ). A carga é mantida constante por um período entre 10 e 30 segundos. A razão entre a carga aplicada sobre a área da esfera é denominado dureza Brinell [4. 8].

$$HB = \frac{2p}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (\text{Eq. 5})$$

Sendo que ( $P$ ) é carga aplicada (em Kgf); ( $d$ ) é o diâmetro da calota ou diâmetro da impressão (em mm) e ( $D$ ) é o diâmetro do penetrador (em mm) [8].

**Figura 12 - Dureza Brinell.**



Fonte: [8]

A norma brasileira para a realização do ensaio é a **NBR ISO 148 - 2**, e a norma internacional de maior utilização é a **ASTM E10 - 93** <sup>[8]</sup>.

O ensaio de dureza Rockwell é o método mais utilizado internacionalmente. Esse tipo de ensaio de dureza utiliza-se da profundidade da impressão causada por um penetrador sob ação de uma carga como indicador da medida de dureza, e não há relação com a área da impressão, como no caso da dureza Brinell.

A dureza Rockwell pode ser classificada como comum ou superficial, dependendo do penetrador e da pré-carga e carga aplicadas <sup>[4, 8]</sup>.

O penetrador tanto pode ser um diamante esferocônico com ângulo 120° e ponta ligeiramente arredondada ( $r=0,2\text{mm}$ ), como uma esfera de aço endurecido, geralmente com diâmetro de 1,59 mm, existindo também nos diâmetros de 3,17 mm, 6,35 mm e 12,70mm <sup>[4]</sup>.

No caso de ensaio de dureza Rockwell, utilizam-se pré-carga de 98N (10kgf) e força (total) de 589N (60kgf); 981N (100kgf) e 1471 N (150kgf), para dureza superficial, pré-carga de 29N (3kgf) e forças de 147N (15kgf), 294N (30kgf) e 441N (45kgf).

A aplicação da pré-carga é necessária para eliminar a ação de eventuais defeitos superficiais e ajudar na fixação do corpo-de-prova no suporte, além de causar pequena deformação permanente, eliminando erros causados pela deformação elástica <sup>[2]</sup>.

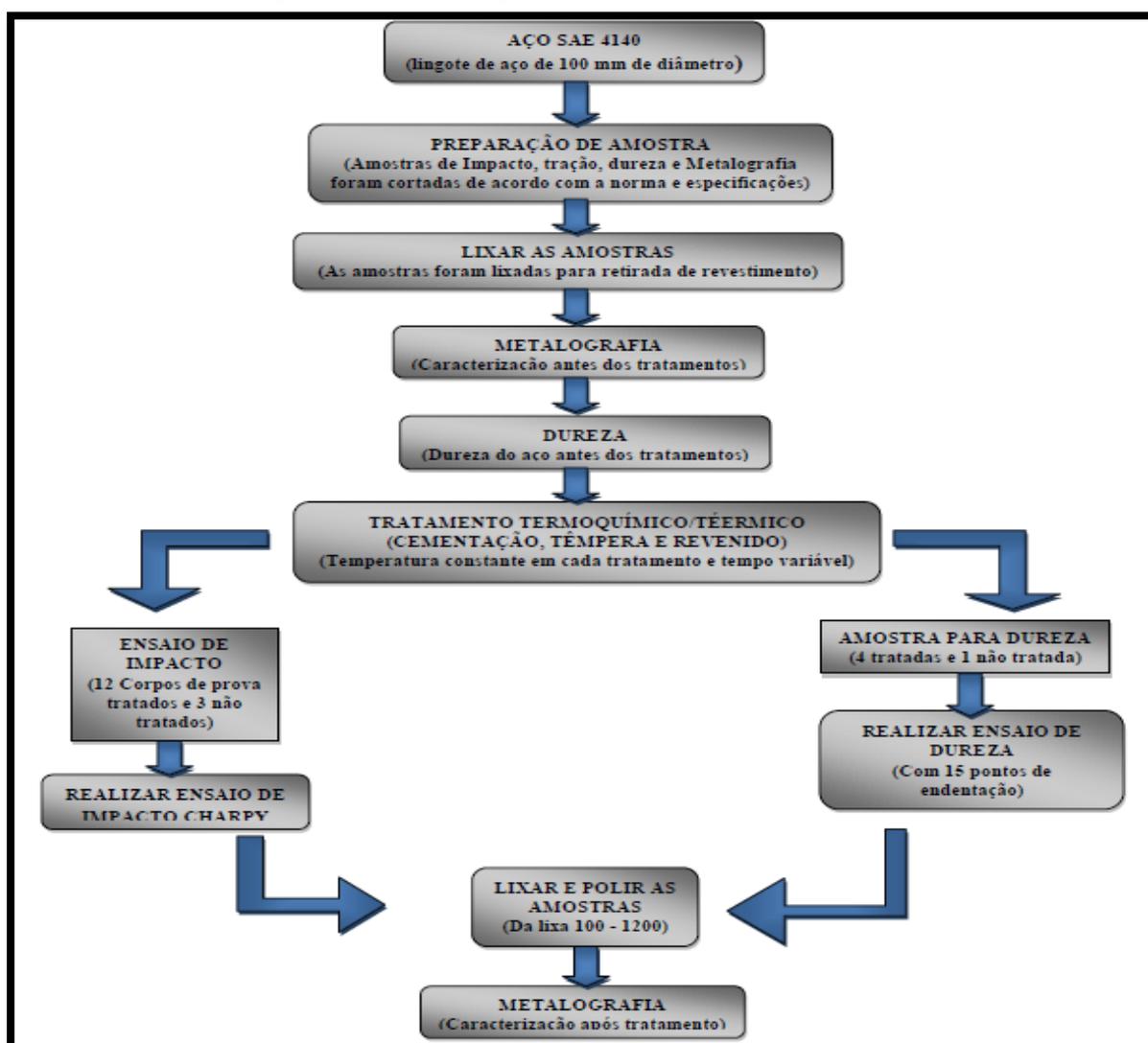
A profundidade de penetração é correlacionada pela máquina de ensaio a um número arbitrário, cuja leitura é feita diretamente na escala da máquina, após a retirada da carga total, mantendo-se, entretanto a carga inicial <sup>[8]</sup>.

## CAPÍTULO III

### 3. METODOLOGIA

Para as análises e ensaios experimentais, foram confeccionados corpos-de-prova de Charpy e amostras planas retangulares, tratadas termoquimicamente em temperaturas pré-definidas e tempos variados conforme o fluxograma da figura 13. Posteriormente realizou-se ensaio de impacto, ensaio de dureza, metalografia e microscopia óptica, para obtenção de dados experimentais específicos e, por conseguinte analisá-los mais precisamente.

**Figura 13** – Fluxograma da prática experimental.



Fonte: [Autor]

### 3.1. PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

A partir de um lingote de aço SAE 4140, foram cortadas cinco amostras retangulares (para realizar a metalografia e a dureza) de aproximadamente 30 mm de comprimento por 20 mm de largura e a espessura padrão de 10 mm, (figura 14). Essas amostras foram cortadas com a máquina de serra fita, utilizando óleo orgânico refrigerante para evitar alterações na microestrutura provocada por calor na região do corte nas amostras.

As amostras destinadas a Metalografia e Dureza antes e após serem tratadas termicamente foram polidas. Esse processo se inicia na lixadeira politriz rotativa, sob refrigeração com água, com a lixa de granulometria 80, passando com o intuito de retirar a camada de tinta na superfície das amostras, e consecutivamente foram utilizadas as lixas de granulometria 100, 220, 320, 400 e 600. Foi realizado o ensaio de dureza antes do tratamento, para obter dados para uma posterior comparação.

Após os tratamentos houve a realização de ensaio de dureza novamente, assim, as amostras foram lixadas com a lixa de granulação 600, 800 e 1200, sempre girando a amostra 90 graus a cada substituição de lixa.

O processo é finalizado com o polimento da amostra. As amostras foram polidas com alumina  $0,3\mu m$ , limpa com álcool etílico e algodão, finalizando o processo, as amostras foram atacadas com Nital 3% (com o objetivo de identificar as fases presentes) por aproximadamente 10 segundos.

Passando esse tempo as amostras são limpas novamente com álcool para finalizar a reação química, e secadas em um secador elétrico, consecutivamente as amostras estão preparadas para a metalografia (ensaio descrito detalhadamente no tópico 3.5).

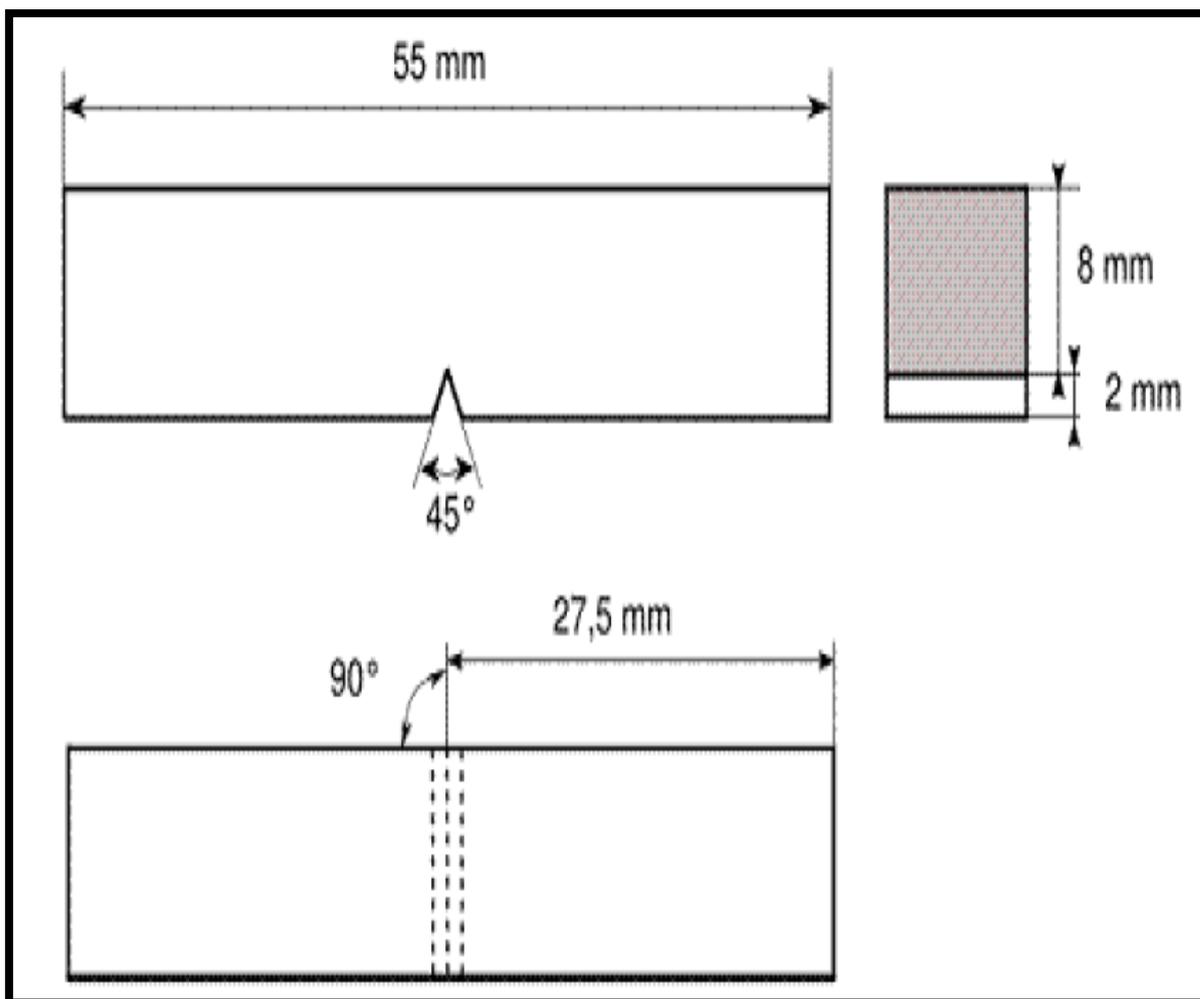
**Figura 14** - Amostra para metalografia e dureza do aço SAE 4140.



**Fonte:** [Autor]

Foram confeccionados quinze corpos de prova para o ensaio de impacto (sendo três corpos de prova para cada condição).

As dimensões apropriadas para o ensaio de impacto são definidas pela norma internacional **ASTM E23 - 94** e nacional **ABNT NBR ISO 148 - 2**, demonstrado na figura 15.

**Figura 15** – Corpo de prova para ensaio de impacto.

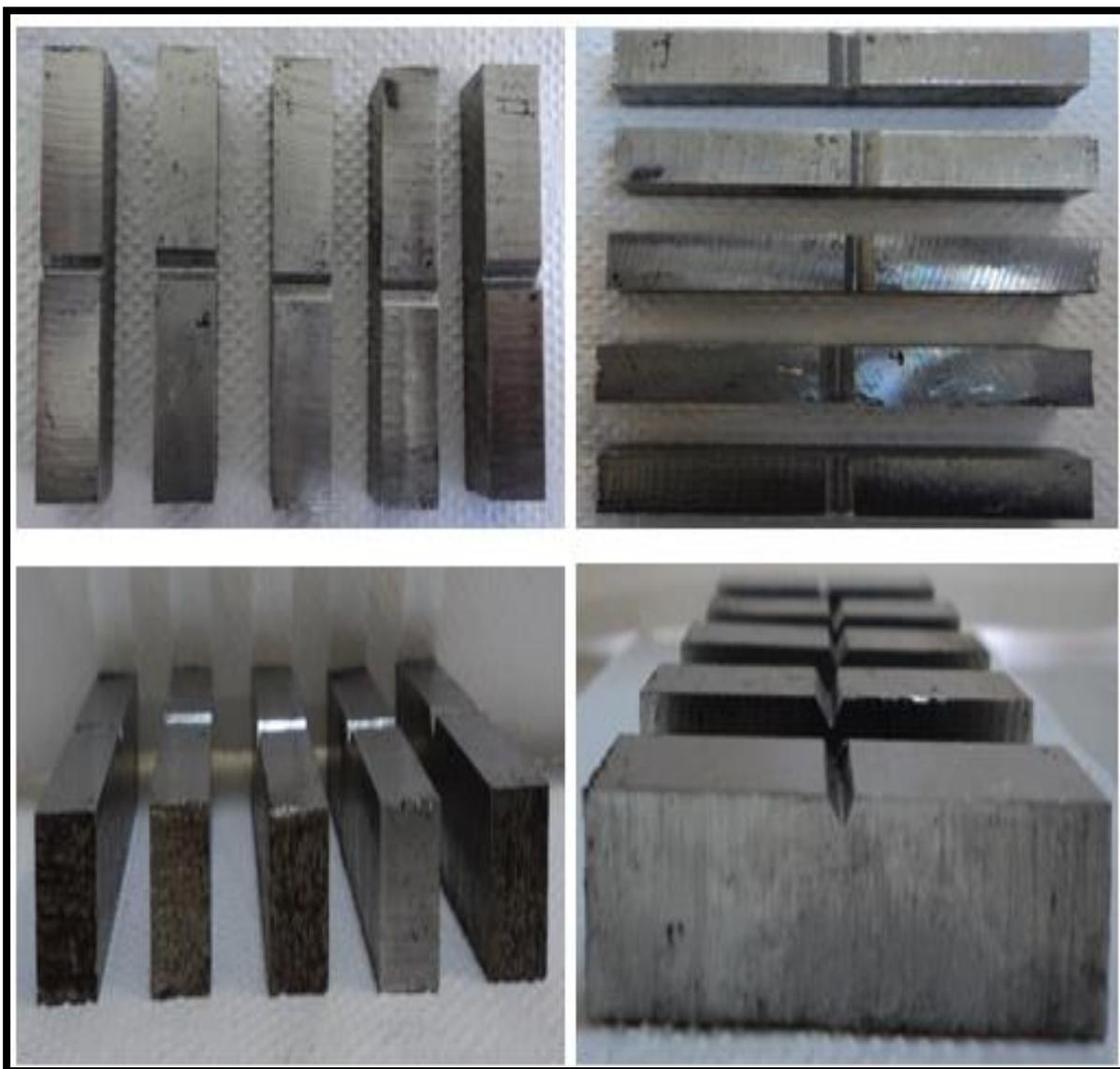
Fonte: [9]

As amostras foram confeccionadas a partir de chapa metálica, na qual foi retirada uma tira com 55 mm de largura em uma plaina metálica, em seguida foi feito o chanfro em V (com o ângulo de 45°) e cortadas com 10 mm de comprimento.

As rebarbas foram retiradas no esmeril e as medidas conferidas com um paquímetro, como mostra a figura 16.

Posteriormente as amostras destinadas ao ensaio de dureza, foram lixadas com lixa de granulação nº 80, com o objetivo de retirar a camada de tinta da superfície das amostras.

**Figura 16** – Corpos de prova para ensaio de impacto.



**Fonte:** [Autor]

### 3.2. TRATAMENTO TERMOQUÍMICO

O tratamento termoquímico realizado nesse trabalho foi cementação sólida, seguindo do tratamento térmico pós cementação, de têmpera e revenido. As amostras foram distribuídas de acordo com a tabela 3.

Tabela 3 - Distribuição dos tratamentos e das amostras.

Tratamento Térmico	Temperatura	Tempo	Ensaio de Impacto		Metalografia / Dureza	
Sem Tratamento	-	-	CP1		Amostra 1	
			CP2			
			CP3			
Cementação	950 °C	4 horas	CP 4	CP 10	Amostra 2	Amostra 4
			CP 5	CP 11		
			CP 6	CP 12		
			CP 7	CP 13	Amostra 3	Amostra 5
			CP 8	CP 14		
			CP 9	CP 15		
Têmpera	850°C	30 minutos	CP 4		Amostra 2	
			CP 5			
			CP 6			
			CP 7		Amostra 3	
			CP 8			
			CP 9			
		60 minutos	CP 10		Amostra 4	
			CP 11			
			CP 12			
			CP 13		Amostra 5	
			CP 14			
			CP 15			
Revenido	450°C	15 minutos	CP 4		Amostra 2	
			CP 5			
			CP 6			
			CP 10		Amostra 4	
			CP 11			
			CP 12			
		30 minutos	CP 7		Amostra 3	
			CP 8			
			CP 9			
			CP 13		Amostra 5	
			CP 14			
			CP 15			

Fonte: [Autor]

### 3.2.1. Cementação

Antes de iniciar o tratamento de cementação foi necessário preparar o coque de injeção (carbono em pó), a sílica, o carbonato de sódio e óleo de linhaça, utilizados no processo.

**Tabela 4** – Proporção dos elementos na cementação.

COMPOSTO	CARVÃO	CARBONATO	MATÉRIA AGLUTINANTE
%	85%	13,50%	1,50%

**Fonte:** [Autor]

O coque foi preparado para obter granulometria passante na peneira 100 *Mesh*. A sílica e o coque foram peneirados (peneira 100 *Mesh*) e levados para estufa por 48 horas a uma temperatura de 100°C, com o objetivo de retirar toda a umidade.

**Figura 17** – Caixa metálica utilizada no tratamento.



**Fonte:** [Autor]

Foi adicionada uma camada de coque de injeção no fundo de uma caixa metálica, posteriormente, todos os corpos de prova para ensaio de impacto e as amostras para metalografia e dureza foram distribuídas sobre a camada de coque de injeção (figura 18).

**Figura 18** - Amostras distribuídas na caixa metálica.



**Fonte:** [Autor]

Logo em seguida, as amostras e corpos de provas distribuídas ao longo da caixa metálica, foram cobertas completamente com uma nova camada de coque de aproximadamente 97,8% de pureza de carbono, carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) que é usado como ativador químico, melhorando assim o efeito do tratamento relacionado à profundidade de penetração de carbono nas peças e como aglutinante o óleo de linhaça.

Feito isso, finaliza-se com uma camada de sílica para impedir o contato do coque de injeção com oxigênio do ar (figura 19).

**Figura 19** - Peças já cobertas com camadas de coque de injeção e sílica.



**Fonte:** [Autor]

A caixa metálica já contendo as amostras foi levada ao forno, após atingir a temperatura de 950°C manteve a mesma dentro do forno por cerca de 4 (quatro) horas. Ao atingir esse tempo na temperatura definida, a caixa foi retirada do forno (figura 20) e resfriada bruscamente até que se atingisse uma temperatura de 650°C (essa redução de temperatura foi controlada com o auxílio de um termopar). Ao atingir 650°C, a caixa metálica foi levada novamente ao forno para ser resfriada lentamente.

Nota-se que as gerações de quantidades apreciáveis de CO<sub>2</sub> dar-se-ão em temperaturas elevadas, de modo a evitar pós cementação. Resfriamentos muito lentos até mais ou menos a faixa de temperatura de 700°C a 650°C, assim, existindo

a formação de quantidade elevada de  $\text{CO}_2$ , origina-se conseqüentemente uma casca mole, o que é indesejado <sup>[2]</sup>.

Com o objetivo de controlar a taxa de resfriamento da peça fora do forno até que se atingisse a temperatura de  $650\text{ }^\circ\text{C}$  utilizou-se termopar (Figura 21), que são sensores de temperatura simples, sendo amplamente utilizados nos mais variados processos de medição de temperatura <sup>[Autor]</sup>.

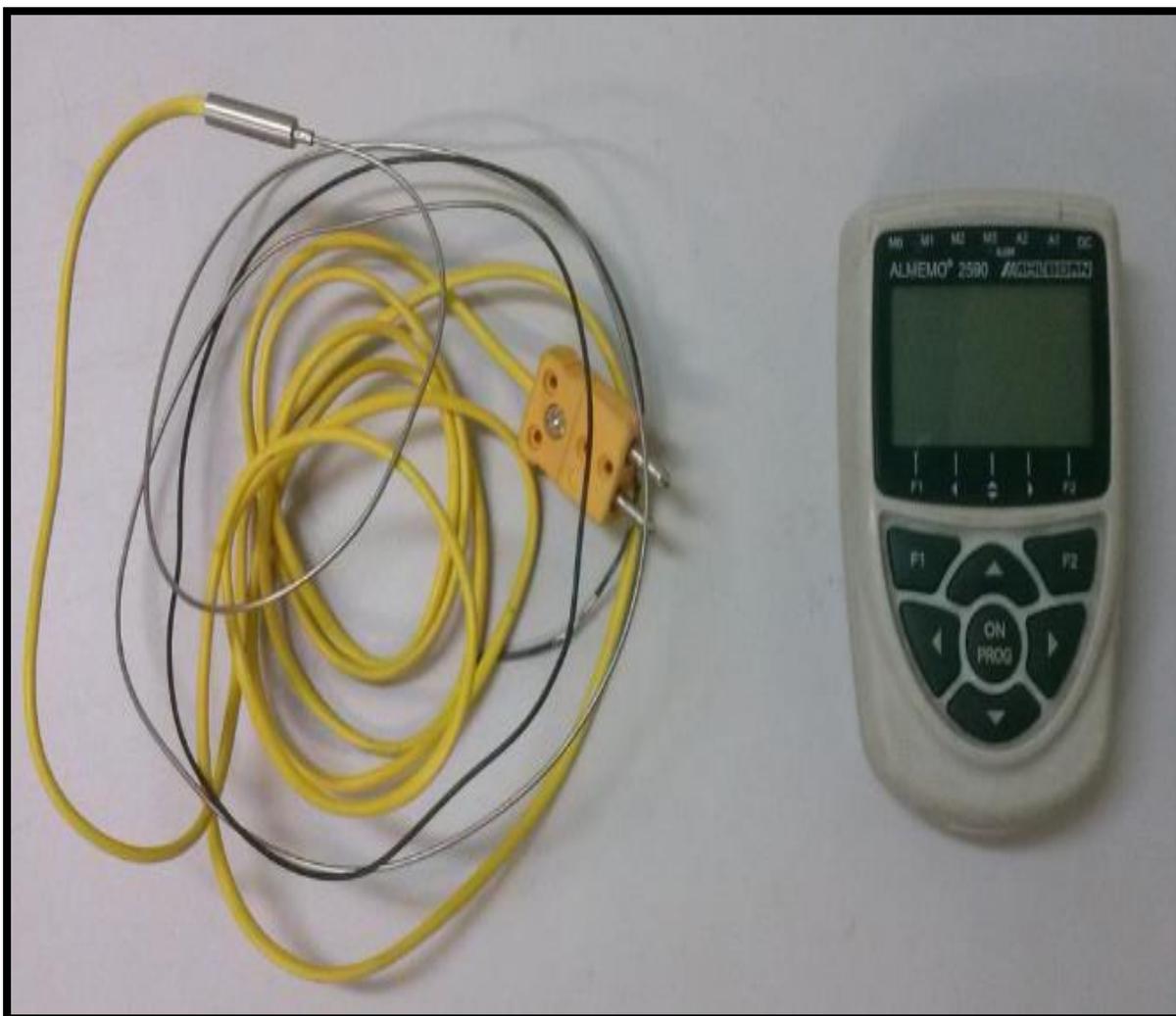
**Figura 20** – Controle de temperatura na peça cementada.



**Fonte:** [Autor]

Um termopar é constituído de dois metais distintos que unidos por sua extremidade formam um circuito fechado, desta maneira gera uma Força Eletromotriz (FEM), que quando conectada a um Instrumento de Leitura consegue ler a temperatura do processo destes Termopares <sup>[3]</sup>.

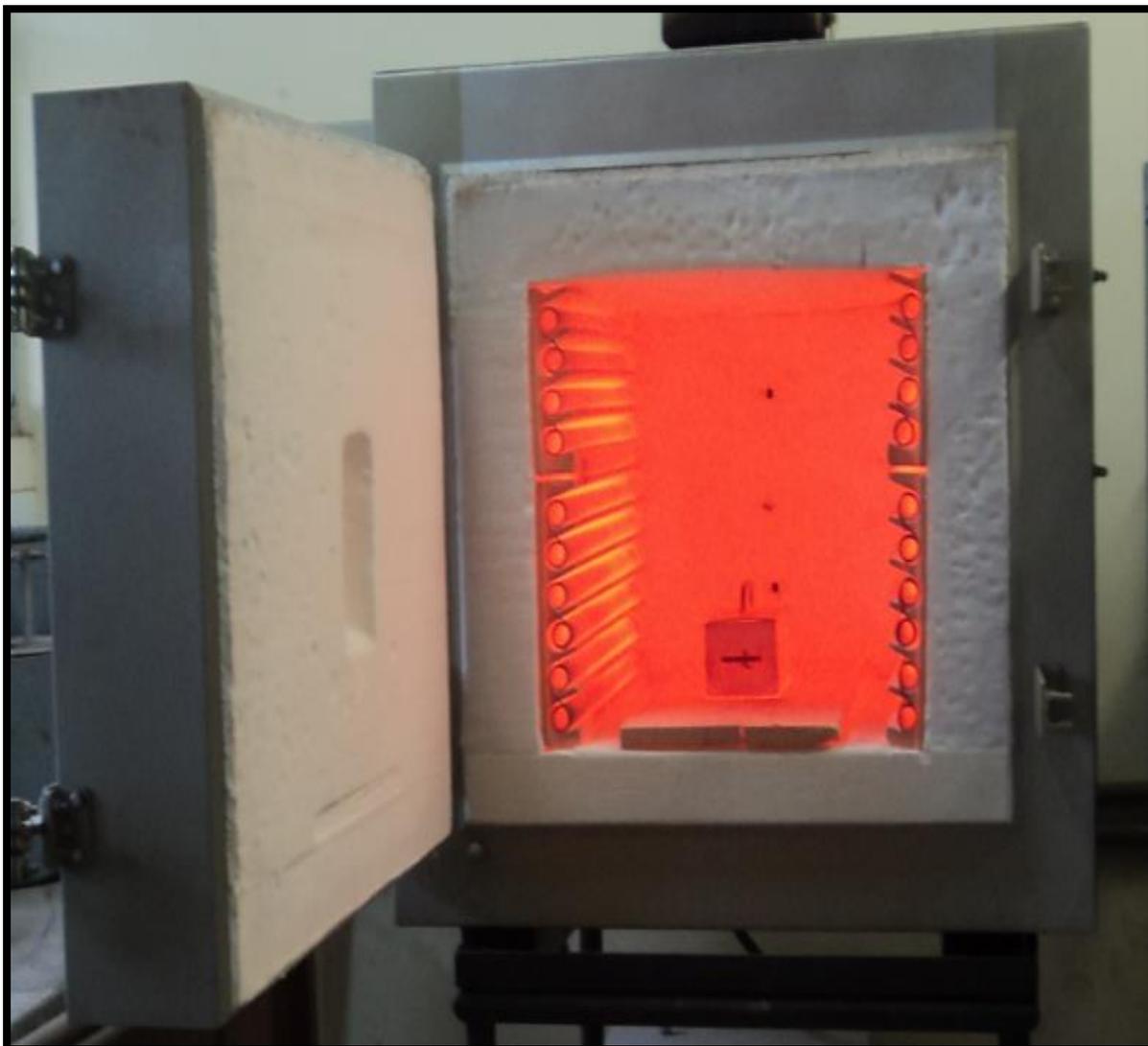
**Figura 21** – Termopar usado no processo de cementação.



**Fonte:** [Autor]

A figura 22 mostra a caixa metálica com as amostra dentro do forno, a caixa foi retirada pra o resfriamento ao ar.

**Figura 22** – Amostras dentro do forno.



**Fonte:** [Autor]

### 3.3. TRATAMENTO TÉRMICO

#### 3.3.1. Têmpera

As peças já cementadas receberam identificação com numero e foram distribuídas de acordo com a tabela 2, ou seja, a metade dos corpos de provas para o ensaio de impacto, e a metade das amostras para o ensaio metalográfico e dureza.

Os corpos de prova foram submetidos a uma têmpera de 850 °C de temperatura com tempos diferentes para a avaliação do grau da tempera. O primeiro

tempo foi durante 30 (trinta) minutos e o segundo tempo de tempera foi durante 60 (sessenta) minutos.

A parte detalhada do tratamento foi: as amostras foram colocadas dentro do forno e aquecidas até 850 °C, após trinta minutos, a metade foi retirada do forno e resfriada bruscamente em água a temperatura ambiente. O mesmo procedimento foi feito com a outra metade, porém foram resfriadas bruscamente depois de 60 minutos após ter atingido a temperatura de 850°C.

### **3.3.2. Revenido**

As amostras foram redistribuídas de acordo com tabela 5 para realizar o tratamento de pós tempera conhecido como revenimento. Assim, metade das amostras temperadas a 850°C durante 30 (trinta) minutos e metade das amostras temperadas a 850°C durante 60 (sessenta) minutos, foram revenidas a 450°C durante 15 (quinze) minutos, e o restante das amostras foram revenidas a 450°C durante 30 (trinta) minutos.

Todas as amostras sofreram resfriamento lento dentro do forno, pois é o fator mais importante do ciclo térmico e determina a microestrutura final obtida no tratamento térmico.

### **3.4. ANÁLISE QUÍMICA**

Análise química é o conjunto de técnicas de laboratório utilizadas na identificação das espécies químicas envolvidas em uma reação de queima, como também a quantidade dessas espécies. Assim, foi feita uma análise química elementar que permitiu determinar quais são os elementos químicos e quanto há de cada elemento no determinado aço em estudo, para isso usou-se o método qualitativo e o quantitativo.

### **3.5. ENSAIO DE DUREZA**

O ensaio de dureza, foi realizado nas 4 (quatro) amostras tratadas termicamente e em 1 (uma) amostra sem tratamento em 5 (cinco) condições distintas, como mostra a tabela 5.

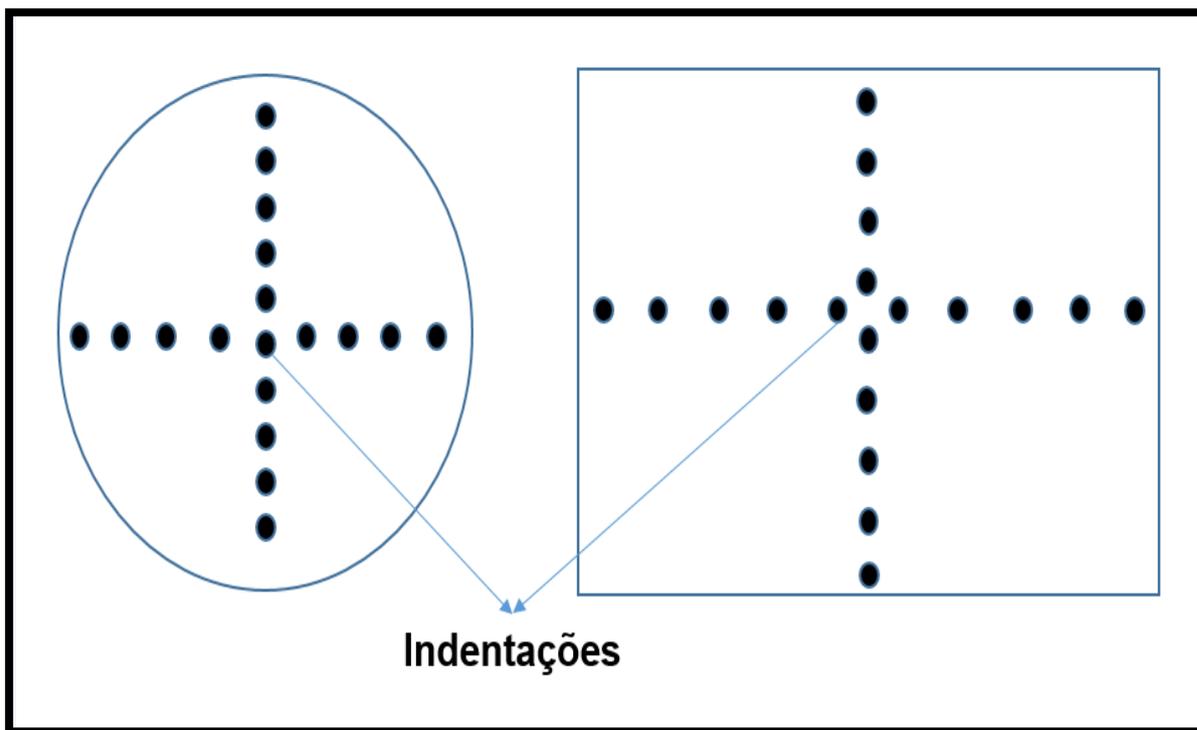
**Tabela 5** - Distribuição das amostras para ensaio de Dureza e Metalografia.

<b>Condição</b>	<b>Tratamento</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Tempo</b>
<b>Condição 1</b>	-	-	-
<b>Condição 2</b>	Cementação	950°C	4 horas
	Têmpera	850°C	30 minutos
	Revenido	450°C	15 minutos
<b>Condição 3</b>	Cementação	950°C	4 horas
	Têmpera	850°C	30 minutos
	Revenido	450°C	30 minutos
<b>Condição 4</b>	Cementação	950°C	4 horas
	Têmpera	850°C	60 minutos
	Revenido	450°C	15 minutos
<b>Condição 5</b>	Cementação	950°C	4 horas
	Têmpera	850°C	60 minutos
	Revenido	450°C	30 minutos

**Fonte:** [Autor]

Para a aferição da dureza nas amostras foi realizado lixamento (amostras foram lixadas até a lixa de numeração 600) e limpeza ao longo da espessura. Foram realizadas medições em cada uma das amostras (figura 23), obtendo no final a média aritmética.

**Figura 23** – Distribuição dos pontos realizados no ensaio de dureza em cada amostra.



Fonte: [Autor]

As medições foram feitas com o durômetro de bancada PANTEC, com dispositivo de impacto (figura 24).

**Figura 24** – Durômetro de bancada.



**Fonte:** [Autor]

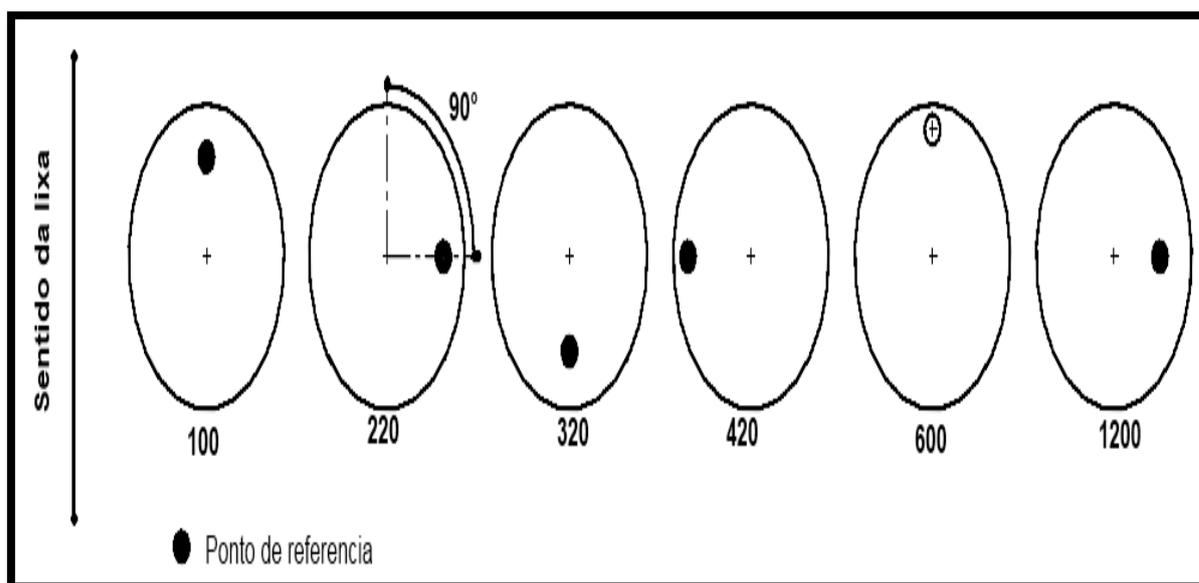
### 3.6. ANÁLISE POR MICROSCOPIA ÓPTICA

Para a preparação de uma superfície plana, isenta de deformações plásticas e mecânicas é necessário um correto lixamento, principalmente considerando-se a diversificação de materiais oriundos da moderna tecnologia industrial <sup>[10]</sup>.

A operação que tem por objetivo eliminar riscos e marcas mais profundas da superfície dando um acabamento a esta superfície, preparando-a para o polimento. Existem dois processos de lixamento: manual (a úmido ou a seco) e automático.

A técnica de lixamento manual consiste em se lixar a amostra sucessivamente com lixas de granulometria cada vez menor (figura 25), mudando-se de direção (90°) em cada lixa subsequente até desaparecerem os traços da lixa anterior <sup>[12]</sup>.

**Figura 25** – Representação esquemática do método de lixamento de trabalho em sentidos alternados.



**Fonte:** [12]

A seqüência mais adequada de lixas para o trabalho metalográfico com aços é 100, 220, 320, 400, 600 e 1200 (Pode haver variações). Para se conseguir um lixamento eficaz é necessário o uso adequado da técnica de lixamento, pois de acordo com a natureza da amostra, a pressão de trabalho e a velocidade de lixamento, surgem deformações plásticas em toda a superfície por amassamento e aumento de temperatura. Esses fatores podem dar uma imagem falseada da amostra, por isso devem-se ter os seguintes cuidados:

- I. Escolha adequada do material de lixamento em relação à amostra e ao tipo de exame final (o que se quer analisar);
- II. A superfície deve estar rigorosamente limpa, isenta de líquidos e graxas que possam provocar reações químicas na superfície;
- III. Riscos profundos que surgirem durante o lixamento deve ser eliminado por novo lixamento;
- IV. Metais diferentes não devem ser lixados com a utilização da mesma lixa.

A próxima etapa é a de polimento, ou seja, é um acabamento com o objetivo de retirar alguns defeitos resultantes da etapa de lixamento. A operação de polimento (pós lixamento) visa um acabamento superficial polido isento de marcas, com isso, utiliza-se para este fim um abrasivo como a pasta de diamante ou alumina [11].

Antes de realizar o polimento deve-se fazer uma limpeza na superfície da amostra, de modo a deixá-la isenta de traços abrasivos, solventes, poeiras e/ou outros. A operação de limpeza pode ser feita simplesmente por lavagem com água, porém, aconselha-se usar líquidos de baixo ponto de ebulição (álcool etílico, fréon líquido, etc.) para que a secagem seja rápida [11].

Posterior ao polimento tem-se o ataque químico, que tem por finalidade revelar a microestrutura e os constituintes da amostra, o que possibilita um maior entendimento das suas propriedades, ou seja, permite a identificação (visualização) e uma análise mais precisa dos contornos de grão e as diferentes fases na microestrutura [12].

Um reagente ácido é colocado em contato com a superfície da peça por certo tempo. O reagente causará a corrosão da superfície. Os reagentes são escolhidos em função do material e dos constituintes microestruturais que se deseja revelar na análise metalográfica microscópica. Após o ataque químico, a amostra é analisada no microscópio óptico e/ou no microscópio eletrônico de varredura, onde são captadas as imagens e feito posteriormente, um estudo mais preciso do material [12].

As amostras polidas (com alumina a  $0,3\mu m$ ) e atacadas (com Nital a 3%) foram levadas ao microscópio de luz direta com câmera digital embutida. Foram feitas análises quantitativa e qualitativa, já que se trata de um aço identificado (SAE 4140).

Foram observadas e fotografadas todas as amostras tratadas (Cementação, Tempera, Revenido) e sem tratamento, nos aumentos de 100x, 200x, 500x e 1000x.

### 3.7. ENSAIO DE IMPACTO

O tipo de ensaio de impacto realizado foi o de Charpy, onde o corpo de prova recebeu uma carga aplicada pelo impacto de um martelo pendular (figura 26), o corpo de prova foi apoiado nas duas extremidades e posicionado horizontalmente.

O martelo é posicionado em uma altura  $H$  (usar corpo de prova como referência), ao ser acionado, o martelo choca-se com a face oposta ao entalhe e continua o seu trajeto até uma altura  $h$  (altura menor que a de partida). Ao obter a altura “ $h$ ” (menor altura), o equipamento de ensaio de impacto já calcula a quantidade resultante de energia absorvida pelo corpo de prova no ato do impacto.

**Figura 26** – Equipamento de ensaio de impacto.



Fonte: [Autor]

O ensaio de impacto seguiu todas as exigências descritas na norma internacional **ASTM - E23 - 94** e nacional **ABNT NBR ISO 148 - 2**.

## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos resultados obtidos através do tratamento termoquímico e térmicos, de análise química, ensaio de impacto, dureza e metalografia, serão mostrados e discutidos a seguir.

#### 4.1. AMOSTRA DO AÇO SAE 4140 SEM TRATAMENTO

##### 4.1.1. Análise química

Através do ensaio de Espectroscopia por Fluorescência de raios-X realizado no laboratório de análise química da empresa Sinobras – Siderúrgica Norte Brasil S/A- obteve-se os seguintes resultados mostrados na tabela 6 para a amostra em questão:

**Tabela 6** – Análise química do aço SAE 4140 sem tratamento (condição 1).

<b>ELEMENTOS PRINCIPAIS (PEÇA SEM TRATAMENTO)</b>							
<b>ANÁLISE</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>	0,390	0,255	0,817	0,033	0,021	0,931	0,169
<b>2</b>	0,381	0,255	0,817	0,031	0,018	0,932	0,167
<b>3</b>	0,385	0,259	0,835	0,033	0,020	0,946	0,173
<b>MÉDIA</b>	<b>0,385</b>	<b>0,256</b>	<b>0,823</b>	<b>0,032</b>	<b>0,020</b>	<b>0,936</b>	<b>0,170</b>
<b>DESVIO</b>	<b>0,005</b>	<b>0,002</b>	<b>0,010</b>	<b>0,001</b>	<b>0,002</b>	<b>0,008</b>	<b>0,003</b>

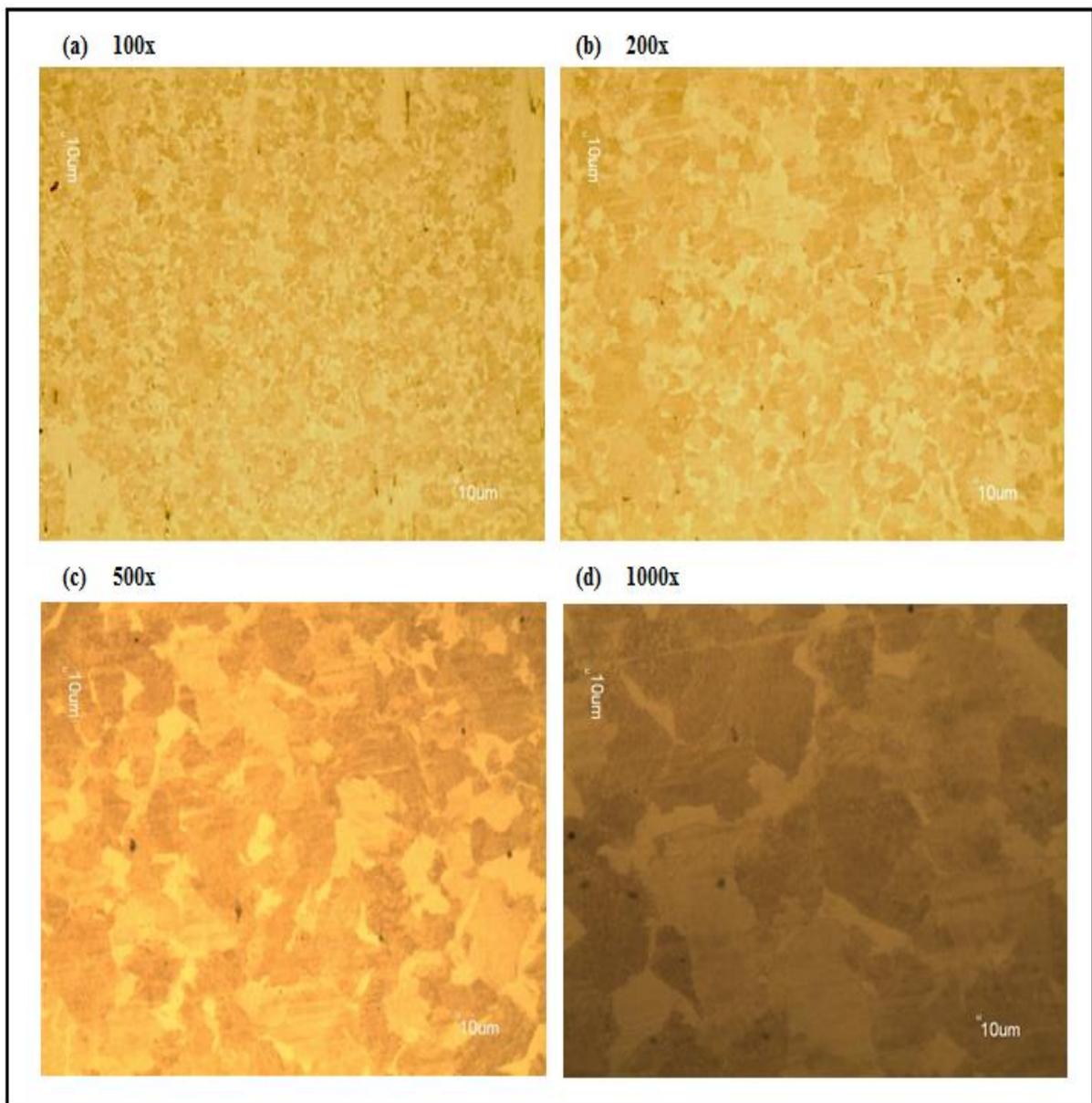
Fonte: [Autor]

Foram realizadas queimas para o procedimento de análise, com isso, foi possível observar que nas três queimas, todos os principais elementos mostrados na tabela acima se encontram dentro das faixas mínimas de composição químicas exigidas.

#### 4.1.2. Análise metalográfica

Foram analisadas as imagens da metalografia e verificou-se que para cada condição descrita anteriormente formaram-se microestruturas diferentes, caracterizando assim propriedades mecânicas distintas.

**Figura 27** – Micrografia da amostra 1 do aço SAE 4140 sem tratamento.



**Fonte:** [Autor]

A amostra 1 do aço SAE 4140 não sofreu tratamento termoquímico e térmicos durante o trabalho. Com isso, a micrografia (figura 27) apresenta grãos de ferrita (coloração mais clara) rodeadas com ilhas de perlita (coloração mais escura), tanto a

ferrita como a perlita apresentam grãos grosseiros, característica normal dos grãos sem tratamentos do aço estudado.

#### 4.1.3. Análise de dureza

Seguem os resultados de medida e desvio padrão de dureza da amostra do aço SAE 4140 na Tabela 7.

**Tabela 7** – Dureza média e desvio padrão da amostra sem tratamento (condição 1).

RESULTADOS	Condição 1 (Sem tratamento)
	26,30
	25,50
	26,10
	27,90
	25,50
	25,70
	26,20
	25,40
	26,60
	27,90
	26,00
	25,30
	28,60
	26,30
27,50	
<b>Média (HRC)</b>	<b>26,45</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>1,04</b>

Fonte: [Autor]

**Figura 28** – Amostras das peças analisadas.



Fonte: [Autor]

#### 4.1.4. Ensaio de impacto

Foi realizado o ensaio de impacto nas amostras sem tratamento térmico, sendo três corpos de prova para o procedimento (figura 29).

**Figura 29** – Amostras de impacto rompidas após ensaio.



Fonte: [Autor]

**Tabela 8** – Energia absorvida pelos corpos de prova de impacto sem tratamentos.

<b>ENSAIO DE IMPACTO (CHARPY)</b>						
<b>CONDIÇÃO</b>	<b>TRATAMENTO TÉMICO</b>	<b>TEMPO</b>	<b>CP</b>	<b>CP</b>	<b>CP</b>	<b>MÉDIA</b>
			<b>01</b>	<b>02</b>	<b>03</b>	
<b>CONDIÇÃO 1</b>	<b>SEM TRATAMENTO</b>	<b>-</b>	<b>28,0</b>	<b>27,8</b>	<b>25,6</b>	<b>27,10</b>

Fonte: [Autor]

#### 4.2. AMOSTRA DO AÇO SAE 4140 APENAS CEMENTADA

##### 4.2.1. Análise química

Através do ensaio de Espectroscopia por Fluorescência de raios-X realizado no laboratório de análise química da empresa Sinobras – Siderúrgica Norte Brasil S/A - obteve-se os seguintes resultados para a amostra em questão:

**Tabela 9** – Composição química após tratamento termoquímico de cementação.

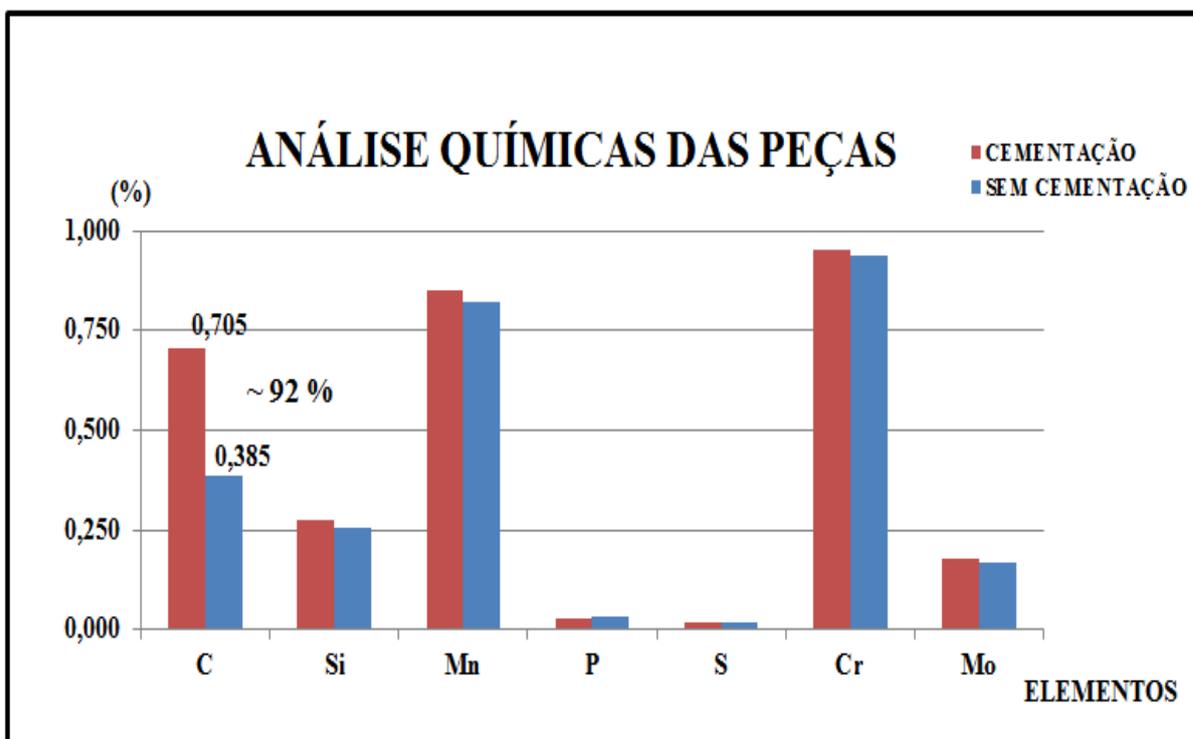
<b>ELEMENTOS PRINCIPAIS (PEÇA APENAS CEMENTADA)</b>							
<b>ANÁLISE</b>	<b>(%) C</b>	<b>(%) Si</b>	<b>(%) Mn</b>	<b>(%) P</b>	<b>(%) S</b>	<b>(%) Cr</b>	<b>(%) Mo</b>
<b>1</b>	0,693	0,280	0,853	0,028	0,016	0,955	0,181
<b>2</b>	0,718	0,277	0,849	0,028	0,019	0,951	0,175
<b>3</b>	0,705	0,272	0,851	0,030	0,019	0,956	0,178
<b>MÉDIA</b>	<b>0,705</b>	<b>0,276</b>	<b>0,851</b>	<b>0,029</b>	<b>0,018</b>	<b>0,954</b>	<b>0,178</b>
<b>DESVIO</b>	<b>0,013</b>	<b>0,004</b>	<b>0,002</b>	<b>0,001</b>	<b>0,002</b>	<b>0,003</b>	<b>0,003</b>

Fonte: [Autor]

Através dos resultados obtidos pela análise química mostrados na tabela 9 acima, verifica-se que após a cementação, praticamente todos os principais elementos constituintes do aço SAE 4140 não tiveram variações significativas de composição química, ou seja, o tratamento para esses elementos não teve grandes influências.

Contudo, se atentarmos somente para o carbono (**C**), verifica-se que após o tratamento de cementação sua composição química variou bastante (figura 30). O teor de carbono na peça que antes do tratamento era de 0,385% C, chegou após o tratamento, a 0,705% C, ou seja, obteve aproximadamente 92% de aumento de carbono na peça.

**Figura 30** – Gráfico comparativo das análises químicas do aço SAE 4140.



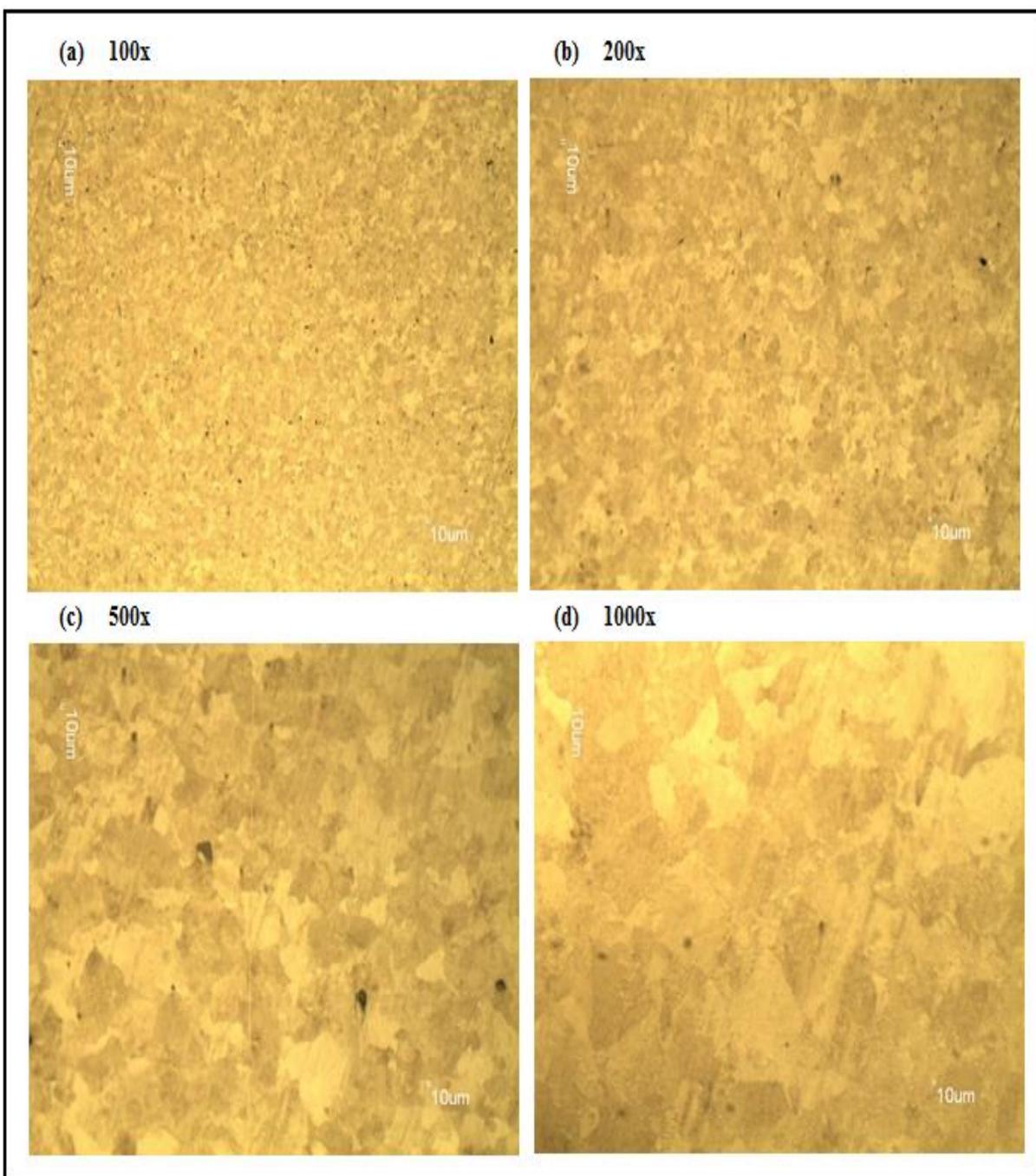
Fonte: [Autor]

Assim, percebe-se que o tratamento obteve o grau de eficiência esperada, haja vista, que o aumento de carbono na peça pela difusão dos átomos, sem provocar grandes alterações na composição química dos outros elementos constituintes do aço é o principal objetivo dos tratamentos termoquímicos de cementação.

#### 4.2.2. Análise metalográfica

As imagens da metalografia foram analisadas para verificar o arranjo microestrutural das peças após a cementação, pois a mesma teve um ganho bastante elevado de carbono, dando assim, características e propriedades diferentes à ela.

**Figura 31** - Micrografia da amostra do aço SAE 4140 apenas cementada.



Fonte: [Autor]

A amostra do aço SAE 4140 sofreu tratamento termoquímico de cementação durante o trabalho, com isso, a micrografia (figura 31) apresenta grãos de ferrita (coloração mais clara) rodeadas com ilhas de perlita (coloração mais escura).

Nota-se que mesmo ainda depois do tratamento termoquímico tanto a ferrita como a perlita apresentam grãos grosseiros e como a peça ganhou um alto teor de carbono, as ilhas de perlita possuem agora uma coloração mais escura do que a amostra sem tratamentos, justamente proveniente desse depósito.

#### 4.2.3. Análise de dureza

Os resultados da figura 32 de dureza da amostra do aço SAE 4140, com a média e desvio padrão após tratamento termoquímico de cementação estão distribuídos na Tabela 10.

**Figura 32** – Análise da dureza em diferentes pontos da peça.



Fonte: [Autor]

Através da análise, nota-se que o aumento do teor de carbono após o tratamento termoquímico de cementação fez com que a dureza na peça também aumentasse.

**Tabela 10** – Dureza média e desvio padrão da amostra cementada.

<b>RESULTADOS</b>	<b>Peça apenas cementada</b>
	33,80
	33,60
	33,30
	32,90
	32,80
	32,60
	32,50
	32,50
	32,00
	32,00
	31,90
	31,70
	31,70
	31,30
31,10	
<b>Média (HRC)</b>	<b>32,38</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,81</b>

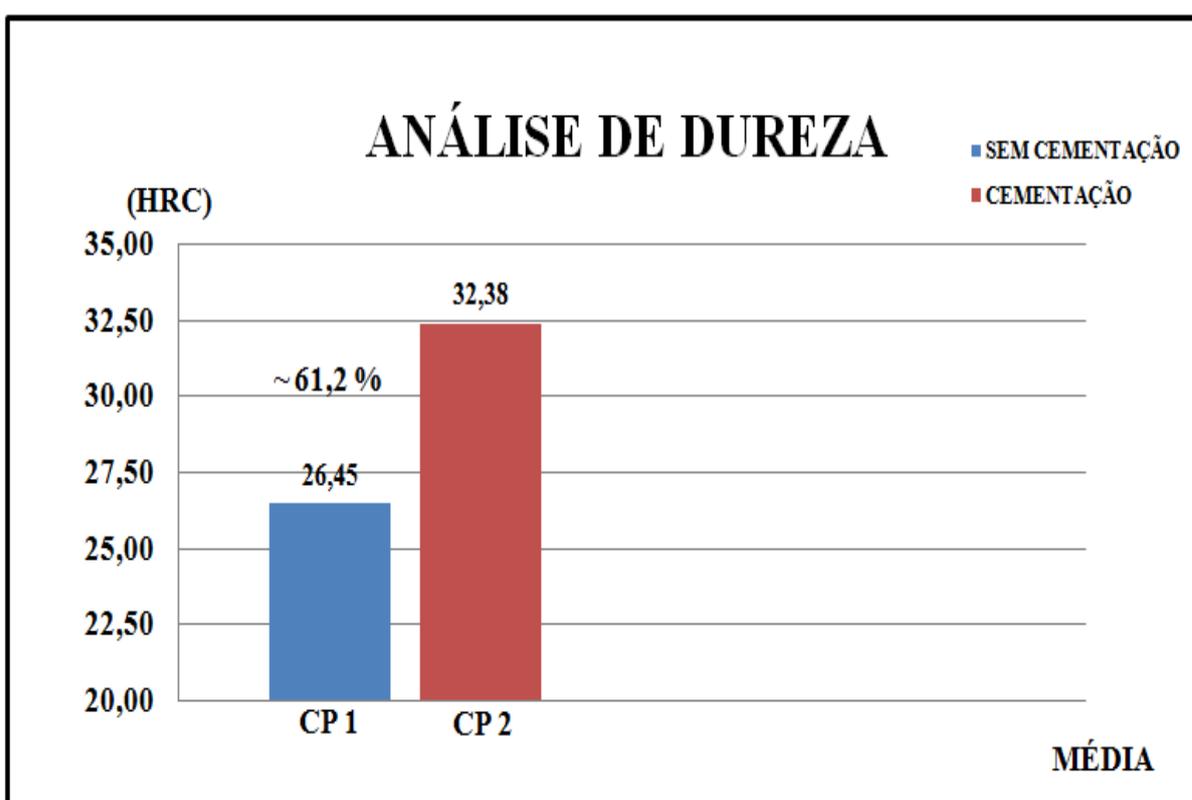
Fonte: [Autor]

O valor que anteriormente ao tratamento era de 26,45 HRC agora após o tratamento, encontra-se na faixa de aproximadamente 32,38 HRC, significando um ganho de 61,2% na dureza no aço (figura 33).

Valor esse que só não foi mais elevado devido a esses carbonos difundidos na cementação na fase austenita, ainda estarem de maneira desordenada na microestrutura do aço.

Assim, podemos deduzir que após as operações de pós-tratamentos termoquímico, (têmpera e revenido), em que conferem ao aço uma organização microestrutural e refino de grãos, a mesma peça possuirá valores de dureza mais elevados do que as amostras apenas cementadas.

**Figura 33** – Gráfico das médias da análise de dureza.



Fonte: [Autor]

#### 4.2.4. Ensaio de impacto

Foi realizado o ensaio de impacto nas amostras, sendo três corpos de prova para o procedimento (figura 34).

A tabela 11 mostra a energia absorvida pelos corpos de prova que receberam apenas tratamento termoquímico de cementação.

**Tabela 11** – Energia absorvida pelos corpos de prova de impacto apenas cementados.

ENSAIO DE IMPACTO (CHARPY) - PEÇAS CEMENTADAS						
CONDIÇÃO	TRATAMENTO	TEMPO	CP 01	CP 02	CP 03	MÉDIA
TRATADA	TERMOQUÍMICO CEMENTAÇÃO	4 horas	8,3	10,7	16,0	11,70

Fonte: [Autor]

**Figura 34** – Amostras de impacto rompidas após ensaio.

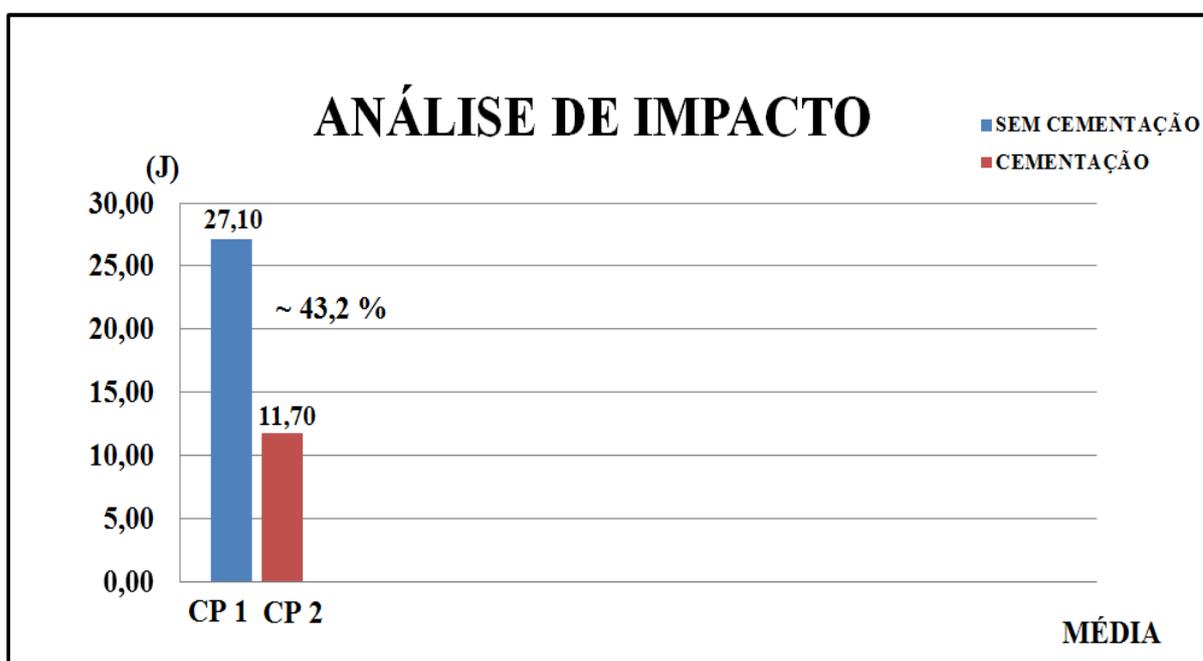


Fonte: [Autor]

Através da análise, nota-se que o aumento do teor de carbono após o tratamento termoquímico de cementação fez com que a dureza na peça também aumentasse, logo, a tenacidade à fratura, por consequência da variação do teor de carbono no aço, sofreu uma diminuição bastante relevante, cerca de aproximadamente 43,2% (Figura 35).

Como mostrado anteriormente na tabela 8, o valor de tenacidade à fratura do aço SAE 4140 sem tratamento (condição 1) era de 27,1 J, ou seja, para que esse aço fraturasse precisar-se-ia de um valor mais elevado de energia.

**Figura 35** – Gráfico das médias da análise de impacto.



Fonte: [Autor]

Porem, após a cementação, a peça teve um ganho de aço bastante significativo, tornando a mesa mais dura.

Assim, como a dureza é inversamente proporcional à tenacidade, essa mesma ficou com sua microestrutura mais fragilizada, ou seja, com o núcleo menos dúctil, pois a resistência ao impacto (tenacidade) diminuiu para cerca de aproximadamente 11,7 J, precisando assim de uma energia mais baixa para ocorrer a fratura.

### 4.3. AMOSTRA DO AÇO SAE 4140 APÓS TRATAMENTO TÉRMICO DE TÊMPERA E REVENIDO

#### 4.3.1. Análise química

**Tabela 12** – Composição química após tratamento de têmpera e revenido.

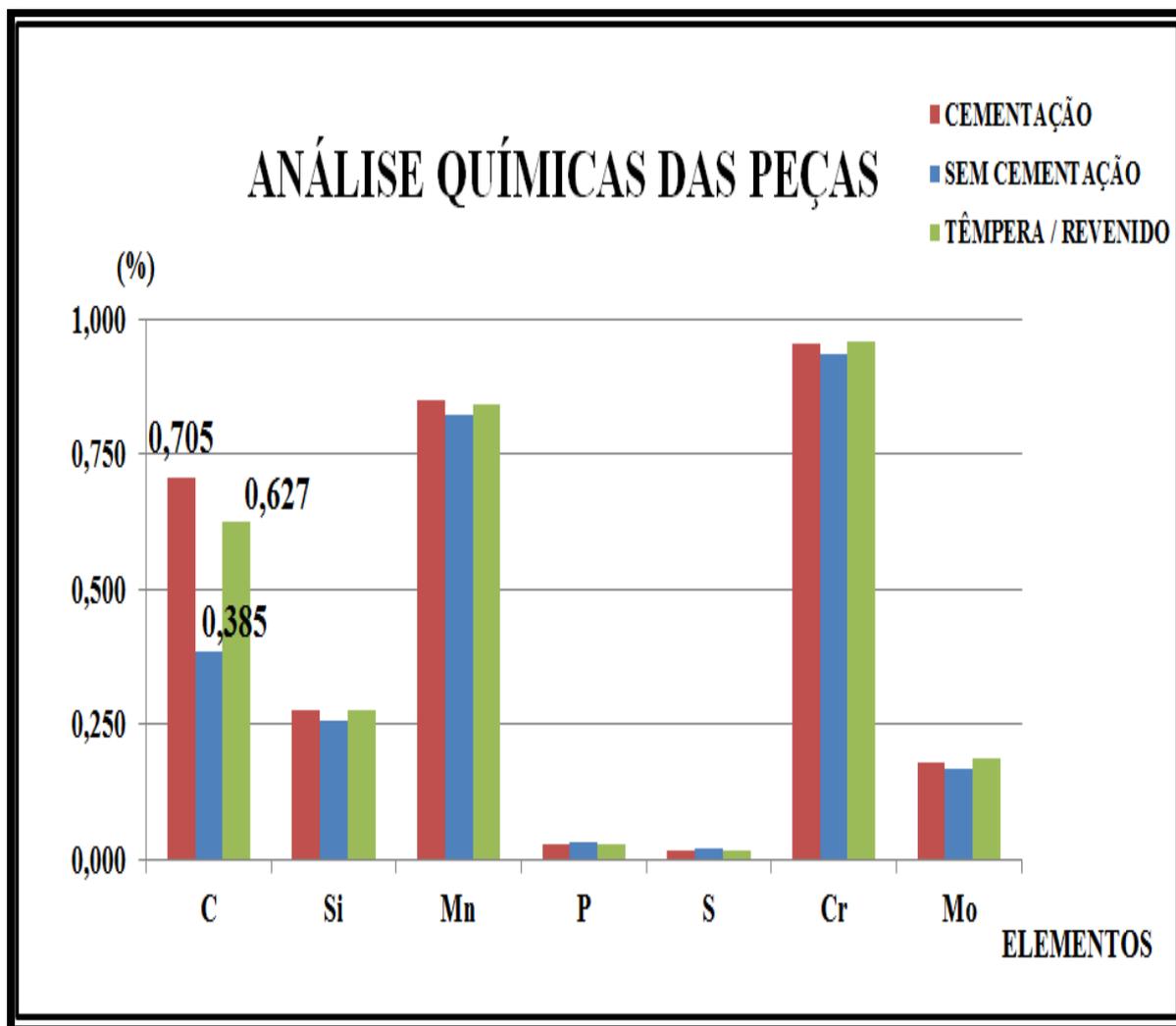
<b>ELEMENTOS PRINCIPAIS (PEÇA TÊMPERADA E REVENIDA)</b>							
<b>ANÁLISE</b>	<b>(%) C</b>	<b>(%) Si</b>	<b>(%) Mn</b>	<b>(%) P</b>	<b>(%) S</b>	<b>(%) Cr</b>	<b>(%) Mo</b>
<b>1</b>	<b>0,628</b>	<b>0,271</b>	<b>0,839</b>	<b>0,026</b>	<b>0,020</b>	<b>0,947</b>	<b>0,173</b>
<b>2</b>	<b>0,614</b>	<b>0,273</b>	<b>0,841</b>	<b>0,030</b>	<b>0,018</b>	<b>0,959</b>	<b>0,178</b>
<b>3</b>	<b>0,638</b>	<b>0,283</b>	<b>0,847</b>	<b>0,032</b>	<b>0,017</b>	<b>0,963</b>	<b>0,210</b>
<b>MÉDIA</b>	<b>0,627</b>	<b>0,276</b>	<b>0,842</b>	<b>0,029</b>	<b>0,018</b>	<b>0,956</b>	<b>0,187</b>
<b>DESVIO</b>	<b>0,012</b>	<b>0,006</b>	<b>0,004</b>	<b>0,003</b>	<b>0,002</b>	<b>0,008</b>	<b>0,020</b>

Fonte: [Autor]

Através dos resultados obtidos pela análise química mostrados acima, verifica-se que após os tratamentos térmicos de pós-cementação todos os principais elementos constituintes do aço SAE 4140 não tiveram variações de composição química.

Assim, todos os processos de tratamento térmico e químico não obtiveram grandes influências para esses elementos secundários.

**Figura 36** – Gráfico comparativo das análises químicas do aço SAE 4140.



**Fonte:** [Autor]

Mas a composição química do carbono (**C**) após o tratamento de cementação variou bastante de 0,385% C para após o tratamento a 0,705% C, ou seja, obteve aproximadamente 92% de aumento de carbono na peça.

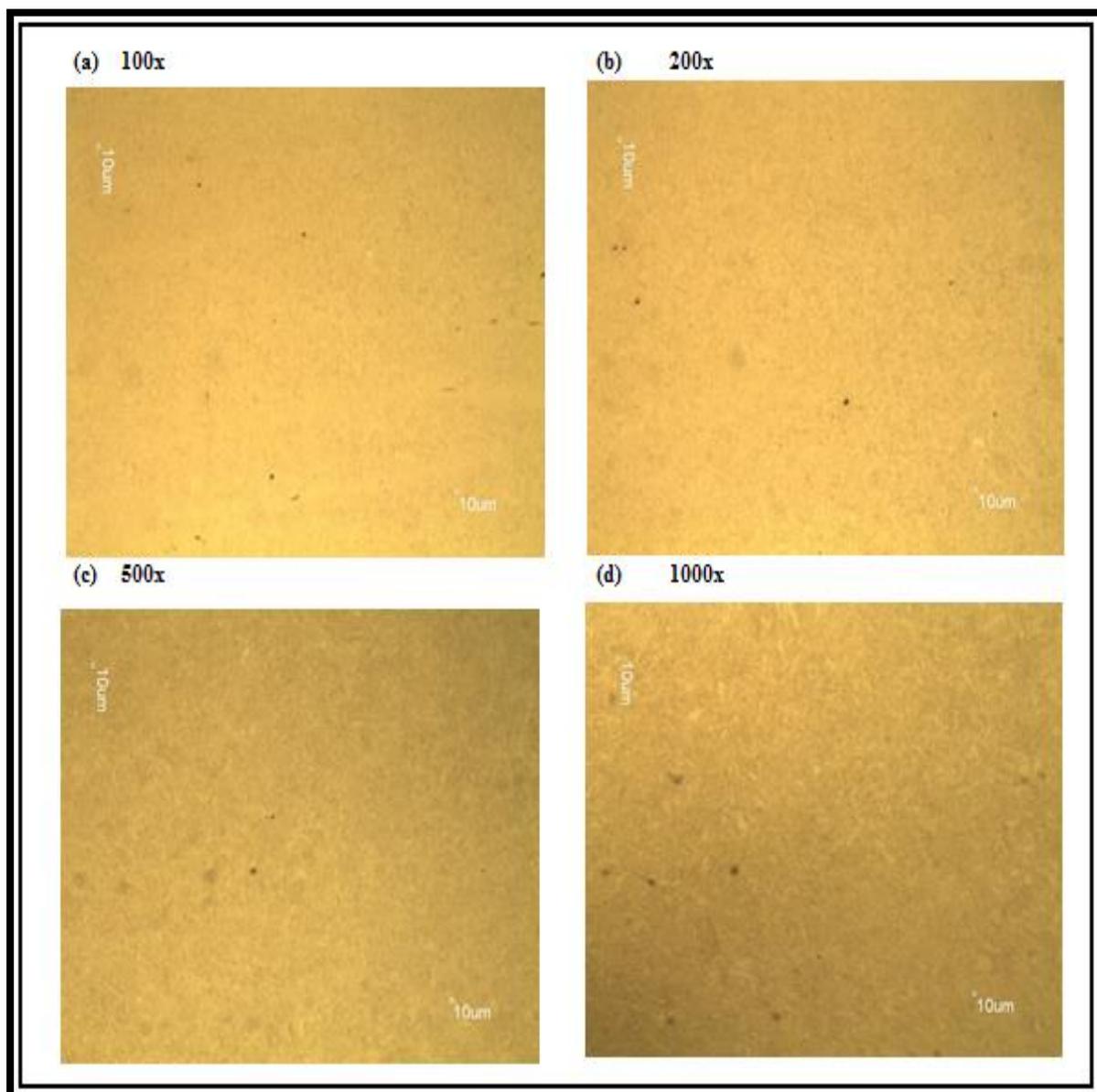
Logo após a têmpera e revenido a composição química variou novamente, pois o carbono diminuiu para 0,627% C (figura 36), ou seja, o teor do elemento ganho na superfície da peça, após os tratamentos posteriores, se rearranjaram na microestrutura do aço, diminuindo o carbono na superfície, assim, a microestrutura fica mais compacta e quase que sem vazios, já que os átomos de carbono soltos na superfície da peça se moveram para dentro e preencheram os intertícios dos contornos de grãos do aço.

### 4.3.2. Análise metalográfica

As imagens da metalografia foram analisadas para verificar o arranjo microestrutural das peças após o tratamento térmico de têmpera e revenido.

#### CONDIÇÃO 2

**Figura 37** – Micrografia da condição 2 do Aço SAE 4140.



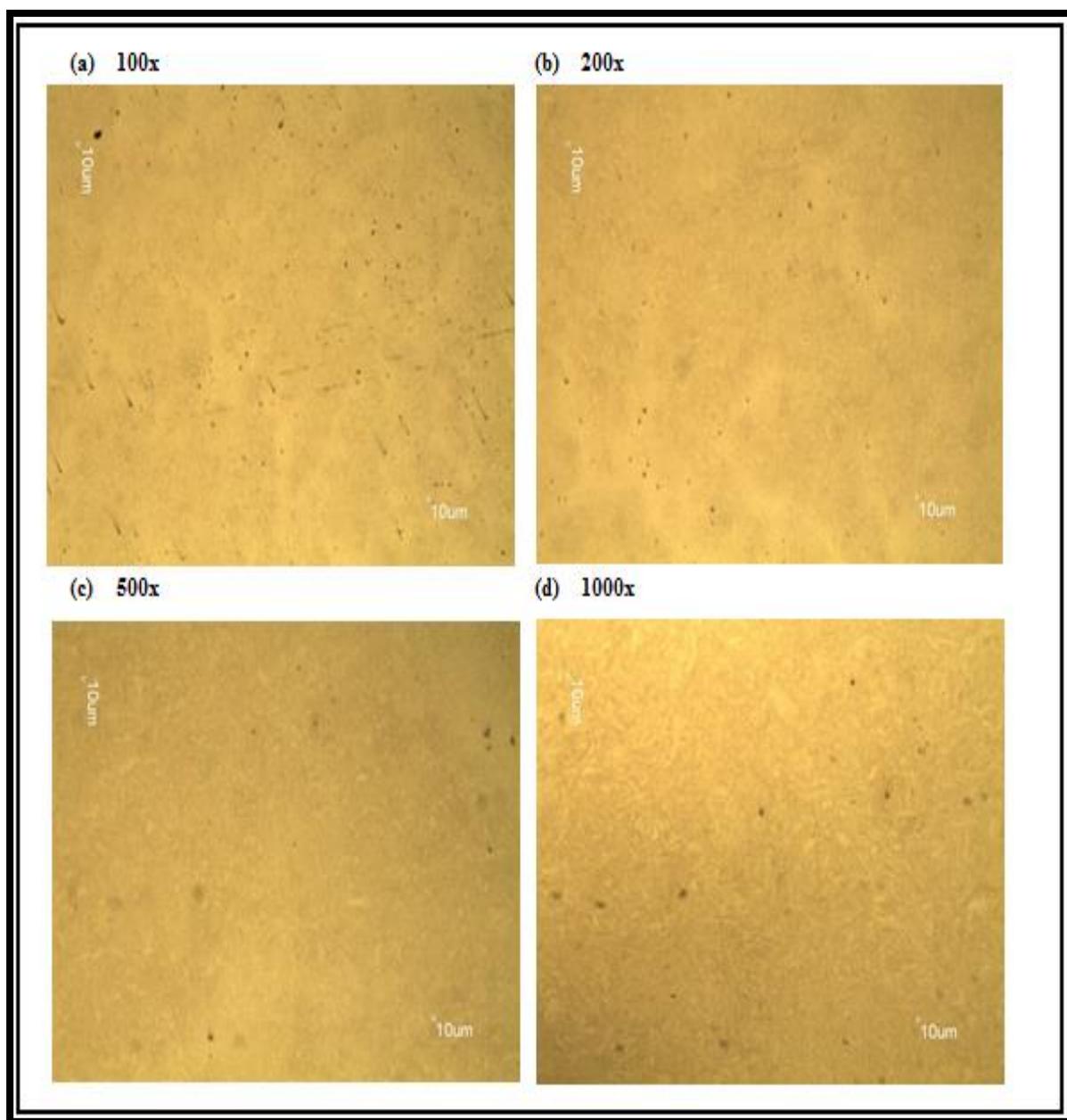
**Fonte:** [Autor]

A peça 2 do aço SAE 4140 submetido a tratamento termoquímico (cementação a 950 °C durante 4 horas), e tratamento térmico pós-cementação

(Têmpera a 850 °C durante 30 minutos e Revenido a 450 °C durante 15 minutos) a micrografia (figura 37) apresenta grãos de martensita (coloração escura), com ilhas de ferrita (coloração clara). Comparando com a amostra 1 (sem tratamento térmico) e a amostra cementada, podemos perceber claramente a formação da martensita após os tratamentos.

### CONDIÇÃO 3

**Figura 38** - Micrografia da condição 3 do Aço SAE 4140.

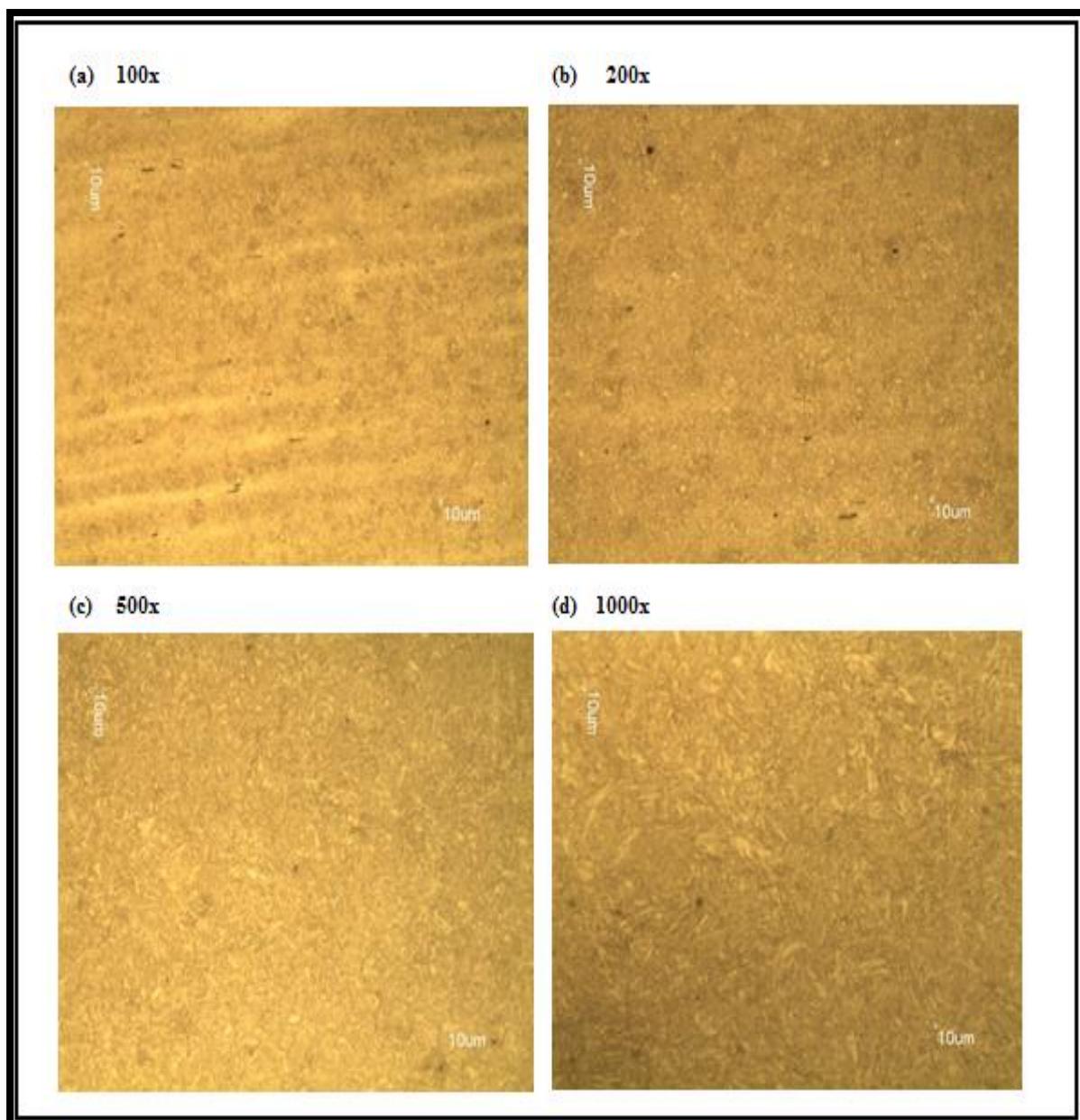


Fonte: [Autor]

A peça 3 do aço SAE 4140 submetido a tratamento termoquímico e tratamento térmico pós-cementação, a micrografia (figura 38) apresenta grãos de martensita (coloração escura), com ilhas de ferrita (coloração clara), a ferrita aumentou de tamanho em relação a micografia anterior. Comparando com a amostra 1 (sem tratamento térmico) e a amostra cementada, podemos perceber claramente o refinamento nos grãos da martensita e ferrita.

#### CONDIÇÃO 4

**Figura 39** - Micrografia da condição 4 do Aço SAE 4140.



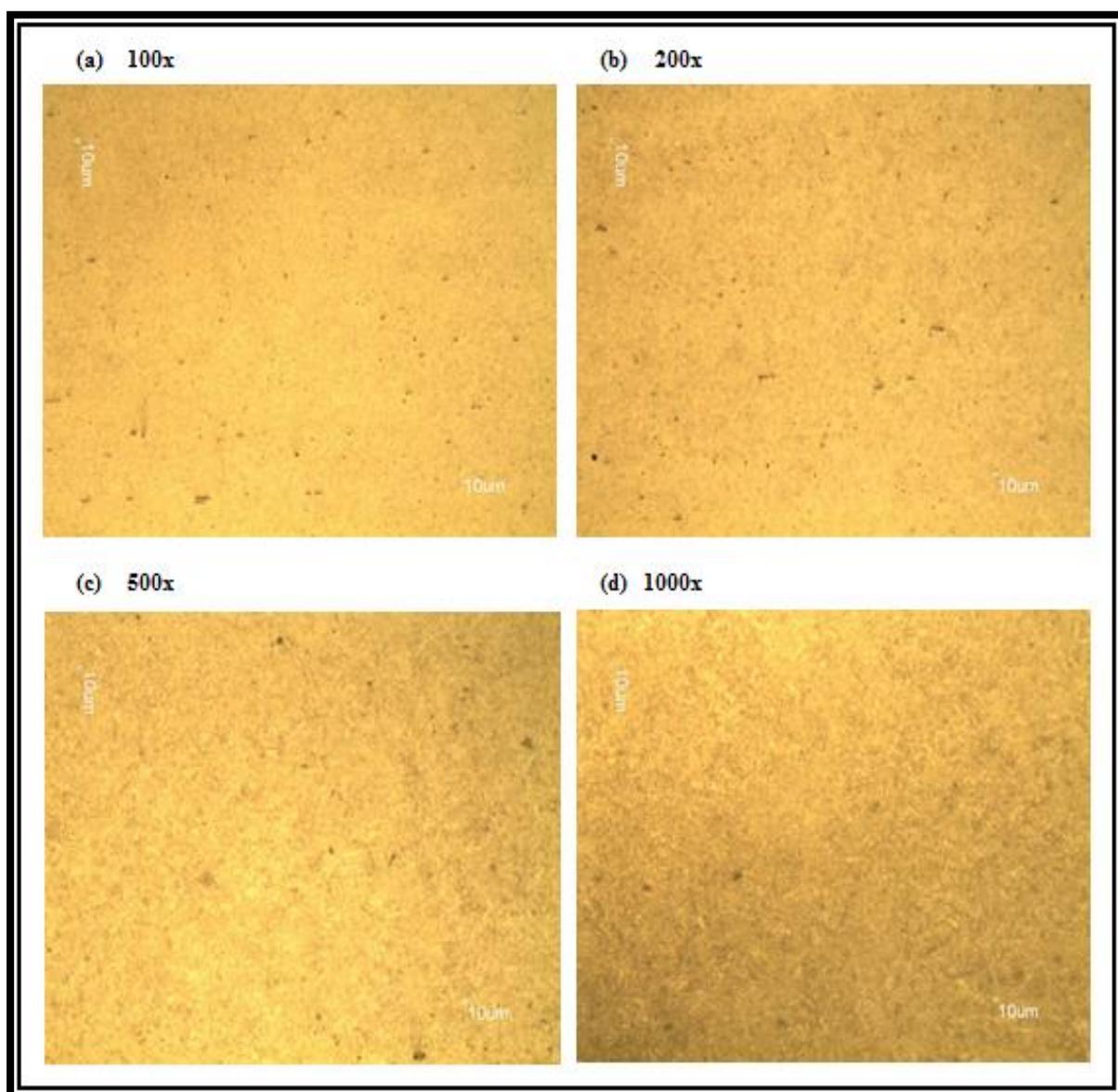
Fonte: [Autor]

A peça 4 do aço SAE 4140 submetido a tratamento termoquímico e tratamento térmico pós-cementação, a micrografia (figura 39) apresenta grãos de martensita (coloração escura), com ilhas de ferrita (coloração clara).

Nota-se nos grãos de martensita um crescimento não uniforme, ou seja, a maioria dos grãos estão em tamanhos maiores e alguns em tamanhos menores com extremidades agulhadas. Comparando com a micrografia da amostra 1 podemos perceber claramente o refino dos grãos de martensita.

## CONDIÇÃO 5

**Figura 40** – Micrografia da condição 5 do Aço SAE 4140.



A peça 5 do aço SAE 4140 submetido a tratamento termoquímico e tratamento térmico pós-cementação, a micrografia (figura 40) apresenta grãos de martensita (coloração escura), com ilhas de ferrita (coloração clara). As ilhas de ferrita estão com diâmetros menores, nota-se que os grãos de martensita estão mais uniformes e refinados em relação às amostras anteriores.

#### 4.3.3. Análise da dureza

Os resultados de dureza do aço SAE 4140, com a média e desvio padrão após tratamento térmico de têmpera e revenido serão mostrados na tabela 13.

**Tabela 13** - Dureza média e desvio padrão geral das condições de tratamentos.

	Condição	Cementação	Condição	Condição	Condição	Condição
	1		2	3	4	5
<b>RESULTADOS</b>	26,30	33,80	52,8	52,2	49,4	48,7
	25,50	33,60	52,4	51,4	48,6	48,6
	26,10	33,30	52,4	50,9	48,3	48,5
	27,90	32,90	52,3	50,8	48,3	48,1
	25,50	32,80	51,8	50,6	48,1	48,1
	25,70	32,60	51,7	50,6	48	48,1
	26,20	32,50	51,3	49,8	48	47,8
	25,40	32,50	50,9	49,7	47,8	47,8
	26,60	32,00	50,6	49,6	48,7	47,2
	27,90	32,00	50,4	49,5	47,7	47,2
	26,00	31,90	50,2	49,4	47,6	46,9
	25,30	31,70	50,1	49,3	47,6	46,3
	28,60	31,70	49,9	48,7	47,6	46,1
	26,30	31,30	49,6	48,4	47,5	44,7
27,50	31,10	49,7	48,3	47,4	43,6	
<b>Média (HRC)</b>	<b>26,45</b>	<b>32,38</b>	<b>51,07</b>	<b>49,95</b>	<b>48,04</b>	<b>47,18</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>1,04</b>	<b>0,71</b>	<b>0,99</b>	<b>0,93</b>	<b>0,40</b>	<b>1,41</b>

Fonte: [Autor]

Com os resultados mostrados na tabela 13, onde estão distribuídas as condições de tratamentos, observa-se que a condição 2 foi a que alcançou o maior valor de dureza, já que antes dos tratamentos (condição 1) a peça tinha dureza média de 26,45 HRC, após a cementação obteve um acréscimo de dureza marcando 32,38 HRC e com a tempera e revido a peça na condição 2 teve sua dureza ainda mais elevada e foi para 51,07 HRC.

Observa-se também que a condição 3 também alcançou valores de dureza elevados, aproximadamente 49,95 HRC, estando com valores abaixo apenas da condição 2.

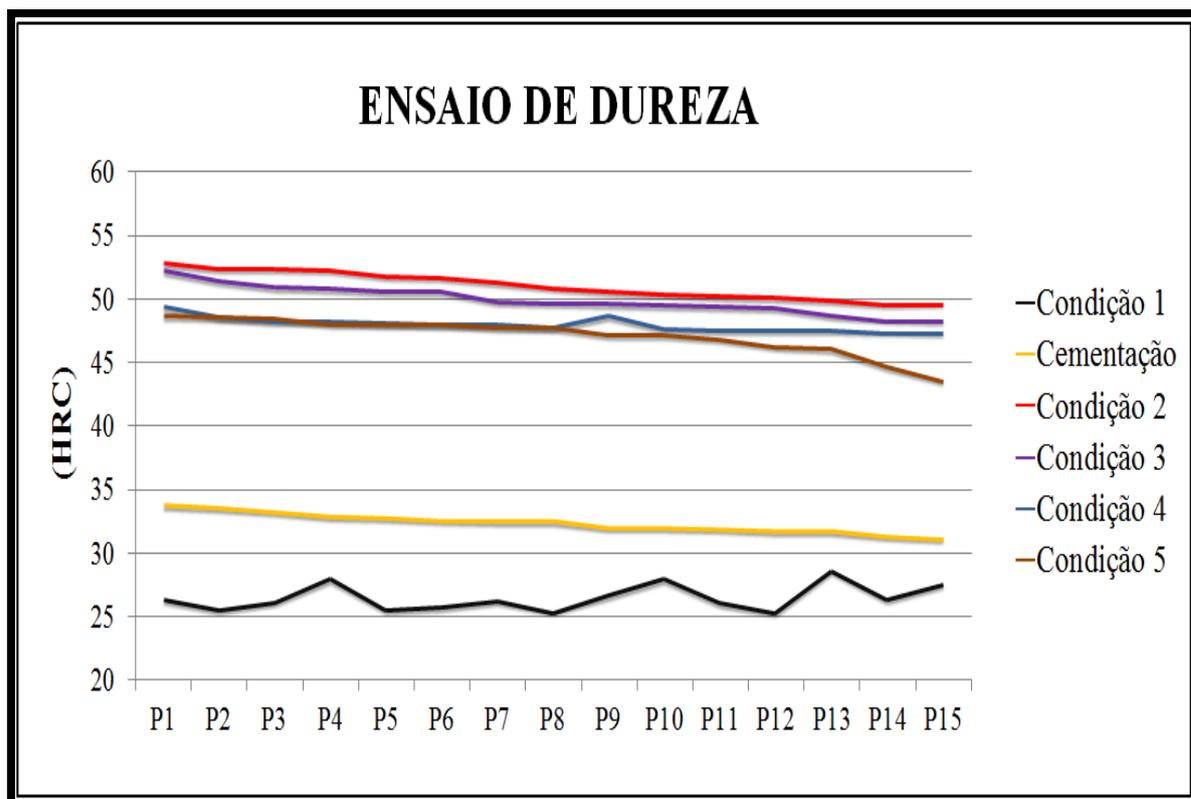
A condição 4 apresenta valores de dureza na ordem de 48,04 HRC, isso mostra que a microestrutura resultante deste tratamento teve um refino de grão mais acentuado, com isso é mais dúctil que as condições 2 e 3.

A condição 5 apresentou o menor valor de dureza dentre que as condições testadas, cerca de 47,18 HRC, isso mostra que a microestrutura resultante deste tratamento é mais dúctil que as demais, portanto, menos resistentes para solicitações que exijam valores elevados de dureza, porém, mais tenás que todas as condições, já que dureza e tenacidade são grandezas inversamente proporcionais.

Assim, para o aço SAE 4140, a condição 2 foi a que teve um melhor arranjo atômico após a difusão de carbono.

A figura 41 mostra o comparativo geral da dureza entre as condições tratadas e não tratadas.

**Figura 41** – Gráfico comparativo geral entre as condições de tratamentos.



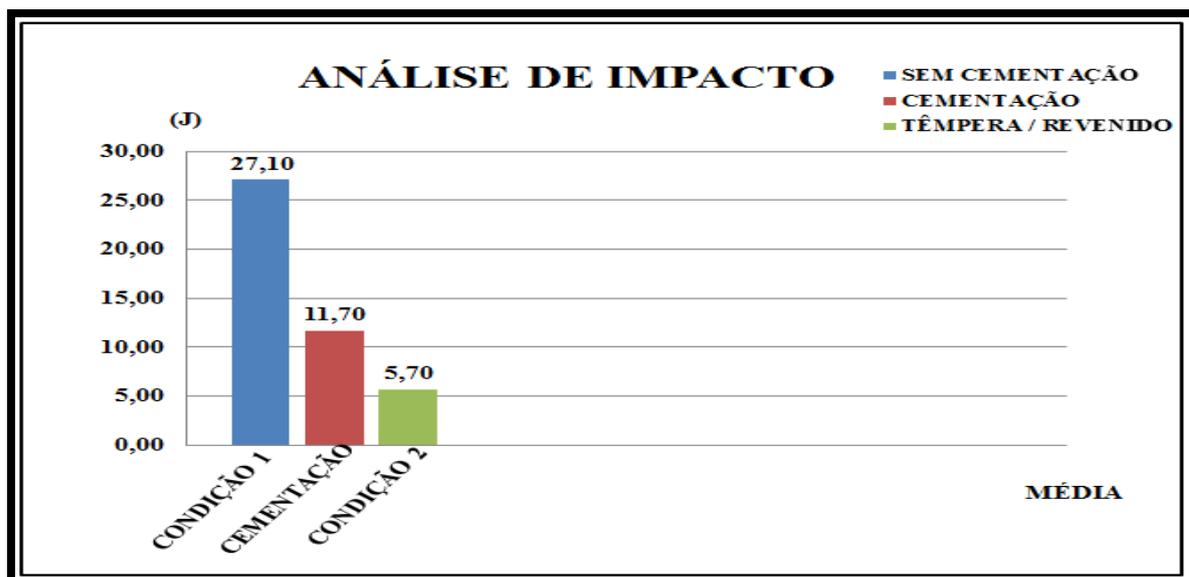
Fonte: [Autor]

#### 4.3.4. Análise de impacto

Foi realizado o ensaio de impacto nas amostras sem tratamento térmico e com tratamento, sendo três corpos de prova para o procedimento.

Os resultados das energias absorvidas nas quatro condições de tratamentos térmicos estão distribuídos na tabela 14, todos os resultados das determinadas condições serão analisados abaixo.

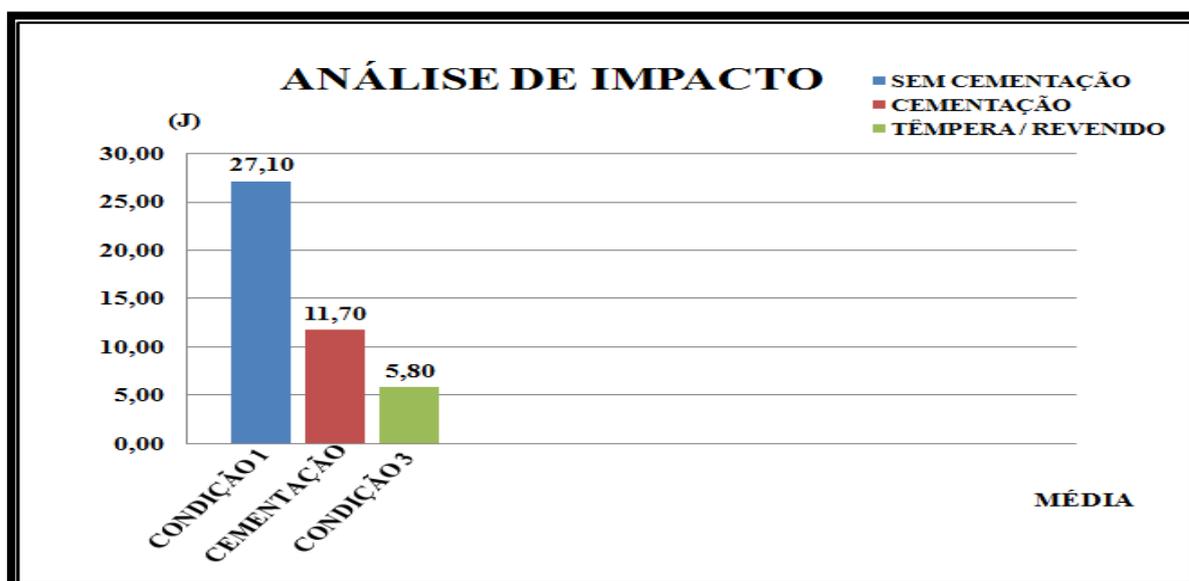
Figura 42 – Gráfico comparativo entre da condição 2.



Fonte: [Autor]

Com os resultados mostrados na figura 42, onde a peça recebeu tratamento termoquímico de cementação e pós-tratamentos de têmpera e revenido, observa-se que foi a condição que menos absorveu energia entre outras antes da ocorrência da fratura, ou seja, o material ficou bastante duro e absorveu cerca de aproximadamente 5,70 J, assim, essa é a condição onde o aço apresenta uma microestrutura mais frágil.

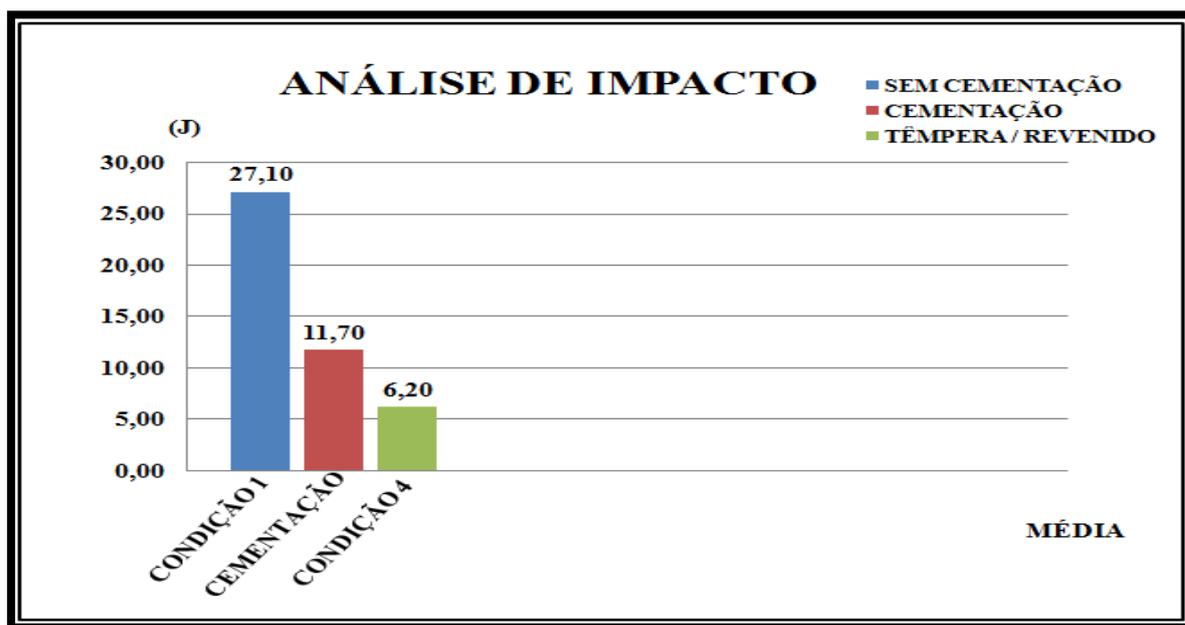
Figura 43 – Gráfico comparativo entre das condição 3.



Fonte: [Autor]

Com os resultados mostrados na figura 43, onde a peça recebeu tratamento termoquímico de cementação e pós-tratamentos de têmpera e revenido, observa-se que esta condição também absorveu pouca energia, aproximadamente 5,80 J, possuindo assim uma microestrutura bastante frágil, e em relação à absorção de energia, está acima apenas da condição anterior.

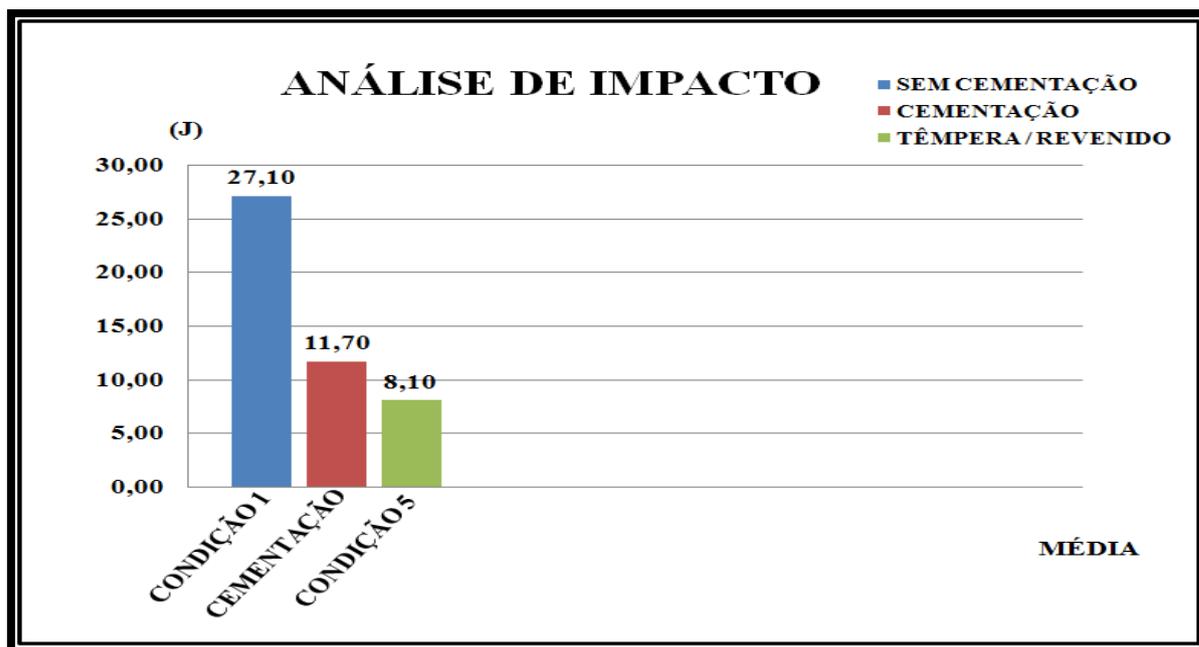
**Figura 44** – Gráfico comparativo entre da condição 4.



Fonte: [Autor]

Com os resultados mostrados na figura 44, onde a peça recebeu tratamento termoquímico de cementação e pós-tratamentos de têmpera e revenido, observa-se que esta condição absorveu mais energia do que as outras citadas anteriormente, aproximadamente 6,20 J, isso mostra que a microestrutura resultante deste tratamento é menos frágil que as demais citadas, ou seja, possui um núcleo dúctil e mais preparado para absorver energia antes de fraturar.

**Figura 45** – Gráfico comparativo da condição 5.



Fonte: [Autor]

Com os resultados mostrados na figura 45, onde a peça recebeu tratamento termoquímico de cementação e pós-tratamentos de têmpera e revenido, observa-se que a condição 5 foi a que absorveu mais energia entre todas as outras citadas, aproximadamente 8,10 J. Isso mostra que a microestrutura resultante deste tratamento é menos frágil e mais dúctil que as demais condições, portanto, mais preparada para absorver energia antes de ocorrer a fratura.

Com relação aos tempos e condições de temperatura da têmpera e revenido, nota-se que para a têmpera com temperatura de 850 °C e tempo de 30 minutos de permanência no forno consegue-se valores de dureza muito elevados, resultando assim numa microestrutura bastante frágil, que passa de austenita, que são sítios preferenciais de nucleação das fases pró-eutetóides e da perlita grosseiros mais ainda assim dúcteis, para martensita, que são placas longas e finas, tais como as lâminas de uma folha que são mais duras, resistentes e frágeis, propriedades que são atribuídas aos átomos de carbono intersticiais que restringem o movimento de discordâncias.

Com a têmpera de 850 °C de temperatura com um tempo de 60 minutos de permanência no forno não se conseguem valores de dureza mais elevados em relação a condição anterior, mas por outro lado, com o revenimento, que é um

tratamento aplicado quando se deseja aliviar tensões internas e aumentar a tenacidade, isto é, diminuir a fragilidade do material de peças nas quais tenham sido produzidas, sua microestrutura martensítica torna-se mais estável e refinada, fazendo com que seu núcleo fique mais dúctil e, por conseguinte, absorva mais energia ao ser impactada.

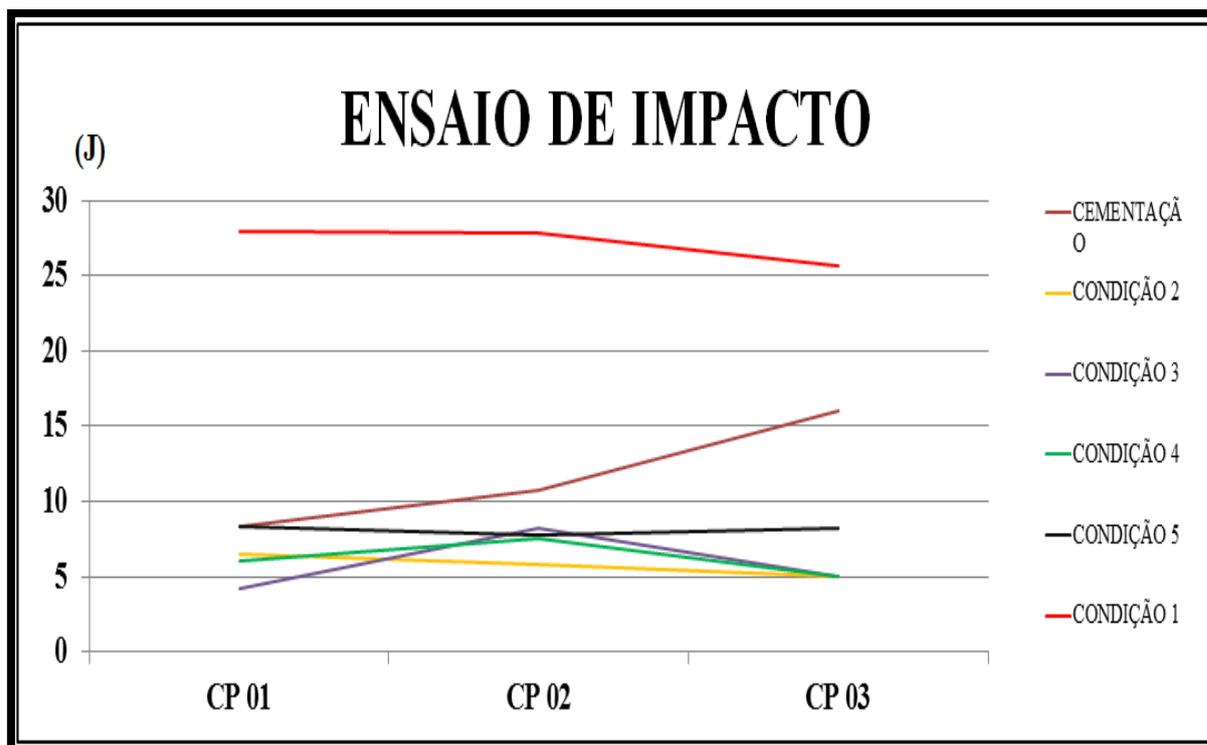
**Tabela 14** – Energia absorvida pelos corpos de prova de impacto.

<b>ENSAIO DE IMPACTO (CHARPY)</b>						
<b>CONDIÇÃO</b>	<b>TRATAMENTO TÉMICO</b>	<b>TEMPO</b>	<b>CP 01</b>	<b>CP 02</b>	<b>CP 03</b>	<b>MÉDIA (J)</b>
<b>CONDIÇÃO 1</b>	<b>Sem Tratamento</b>	<b>-</b>	<b>28,0</b>	<b>27,8</b>	<b>25,6</b>	<b>27,1</b>
<b>TRATADA</b>	<b>Cementação</b>	<b>4 horas</b>	<b>8,3</b>	<b>10,7</b>	<b>16,0</b>	<b>11,7</b>
<b>CONDIÇÃO 2</b>	<b>Tempera / Revenido</b>	<b>30 / 15</b>	<b>6,5</b>	<b>5,8</b>	<b>5,0</b>	<b>5,7</b>
<b>CONDIÇÃO 3</b>	<b>Tempera / Revenido</b>	<b>30 / 30</b>	<b>4,2</b>	<b>8,2</b>	<b>5,0</b>	<b>5,8</b>
<b>CONDIÇÃO 4</b>	<b>Tempera / Revenido</b>	<b>60 / 15</b>	<b>6,0</b>	<b>7,5</b>	<b>5,0</b>	<b>6,2</b>
<b>CONDIÇÃO 5</b>	<b>Tempera / Revenido</b>	<b>60 / 30</b>	<b>8,3</b>	<b>7,8</b>	<b>8,2</b>	<b>8,1</b>

**Fonte:** [Autor]

Assim, nas condições mostradas e testadas é possível prever através da microestrutura resultante de cada condição, qual propriedade se destina melhor para cada tipo de solicitação de serviço, ou seja, consegue-se, por comparação, uma relação ideal de dureza e tenacidade.

**Figura 46** – Gráfico comparativo geral entre as condições.



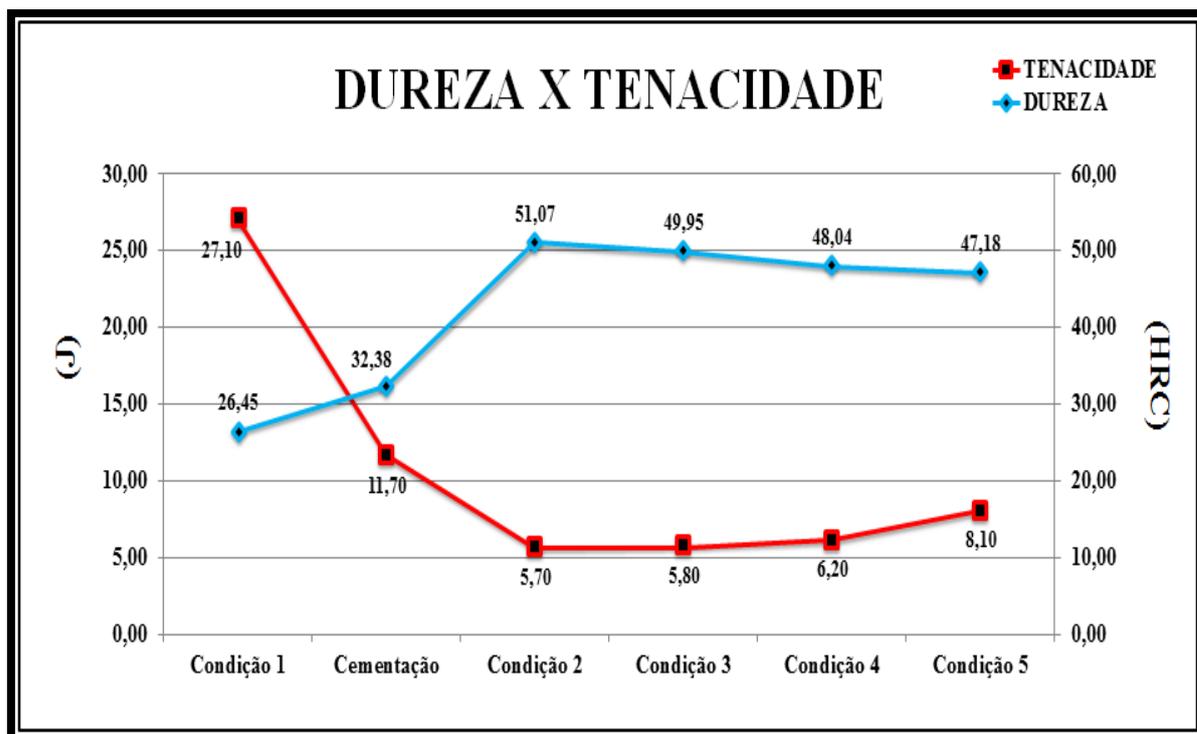
**Fonte:** [Autor]

#### 4.4. COMPARAÇÃO DA DUREZA VERSUS TENACIDADE

Com o gráfico de Dureza x Tenacidade (figura 47), podemos perceber que são inversamente proporcionais, ou seja, quanto maior a dureza, menor a tenacidade. Isso ocorre quando a dureza do material é maior, assim, o material é frágil, com isso, rompe facilmente quando submetido ao impacto, já que absorve valores baixos de energia.

Assim como a tenacidade é a capacidade de absorção de energia mecânica em regime elástico e plástico e é representada pela área total do diagrama tensão-deformação e a dureza é a resistência ao risco, que é medida experimentalmente por vários processos, como a resistência oferecida pela superfície à penetração, nota-se, levando em consideração a maior dureza e menor energia que a condição 2 é a mais adequada.

Figura 47 - Gráfico de Dureza x Tenacidade.



Fonte: [Autor]

## 5. CONCLUSÕES

- Objetivo do tratamento termoquímico a avaliação ao impacto e aumentar a dureza do aço SAE 4140, assim, a peça cementada obteve resultados interessantes e a condição 2 obteve o melhor resultado. Logo, podemos ratificar esses resultados através dos ensaios de dureza, impacto e metalografia do aço SAE 4140.
- Através dos resultados obtidos pela análise química, verifica-se que após os tratamentos térmicos de pós-cementação todos os principais elementos constituintes do aço SAE 4140 não tiveram variações de composição química, contudo, se atentarmos somente para o carbono (**C**), verifica-se que o tratamento de cementação obteve o grau de eficiência esperada, haja vista, que o aumento de carbono na peça pela difusão dos átomos, sem provocar grandes alterações na composição química dos outros elementos constituintes do aço é o principal objetivo dos tratamentos termoquímicos de cementação, obtendo assim aproximadamente 92% de aumento de carbono na peça.
- Através da metalografia foi possível concluir que, para as amostras tratadas, a que obteve uma melhor microestrutura foi a amostra submetido a condição 2 (cementação a 950°C durante 4 horas, Têmpera a 850°C durante 30 minutos e Revenido a 450°C durante 15 minutos), os grãos de martensita se formaram e desenvolveram-se acarretando na diminuição de ferrita, caracterizando uma maior dureza no aço SAE 4140.
- No ensaio de dureza a amostra submetido a condição 2, com o menor tempo de tratamento térmico (cementação a 950°C durante 4 horas, Têmpera a 850°C durante 30 minutos e Revenido a 450°C durante 15 minutos) ocorreu a formação e o refino dos grãos martensíticos, ponto esse que apresentou a maior dureza.
- Pelo ensaio de impacto, percebe-se que a condição 5 (cementação a 950°C durante 4 horas, Têmpera a 850°C durante 60 minutos e Revenido a 450°C durante 30 minutos) obteve o maior valor de absorção de energia ao impacto, caracterizando a maior ductibilidade do material entre as condições trabalhadas, com isso podemos afirmar que obteve o menor valor de dureza.
- A amostra submetido a condição 2, obteve um aumento de dureza em relação a amostras da condição 1 (sem tratamento) e a cementada. Já as amostras da

condição 3,4,5 a dureza diminui em comparação com a amostra da condição 2, podendo ter ocorrido uma descarbonetação devido as condições de tratamento utilizado.

- Apesar da microestrutura das amostras da condição 3, 4 e 5, ter formado uma quantidade relativamente alta de martensita, elas apresentaram valores de dureza menores do que a amostra na condição 2, isso se deu pelo grau de severidade do tratamento da condição 2 ser maior do que nas outras condições, assim, houve a formação de uma martensita grosseira, logo, como nas outras condições 3, 4, 5 a severidade não foi tal alta, as microestruturas ficaram mais refinadas, ou seja, mais dúcteis e menos frágeis.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudo das propriedades mecânicas através do ensaio de tração do aço SAE 4140;
- Estudo da tenacidade do aço SAE 4140, utilizando outro tratamento termoquímico;
- Alteração dos parâmetros de temperatura e tempo dos tratamentos térmico de Tempera e Revenido com o objetivo da formação da microestrutura martensítica para o aço SAE 4140;
- O levantamento da curva de transição dúctil-frágil para o aço 4140;
- Estudo do teor de carbono absorvido para aços especiais com diferentes matérias-primas, após tratamento termoquímico de cementação através de análise química das amostras tratada.

## 7. REFERÊNCIAS

- [1] Centro universitário Padre Anchieta. **Ciência dos materiais – Aços carbono**. Unianchieta, Jundiá-São Paulo, 2007.
- [2] CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 6. ed. São Paulo: ABM, 1988.
- [3] CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 7ª. Edição /// Trad. Sérgio Murilo Stamile Soares, Rio de Janeiro, 2008.
- [4] PANDOLFO, Diogo. **Estudo da Tenacidade ao Impacto de um aço SAE 1020 Submetido a Tratamento Térmico**. Porto Alegre. Trabalho de Conclusão de Curso, PUCRS, 2009.
- [5] Armco Brasil. **Tratamentos térmicos: têmpera e revenimento**. Informativo quadrimestral “AÇÃO”, ano 1- nº 4. 2004.
- [6] MOURAO, B. M., et al. **Introdução à Siderurgia**. 2007. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais.
- [7] TOTEN, George E. **Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel**. ASM International, 2002 – Pg. 298-299.
- [8] DOS SANTOS, Carlos A.; SPIM, Jaime A; GARCIA, Amauri. **Ensaio dos Materiais**. Rio de Janeiro, 2008.
- [9] AMERICAN society for metals. **Metals Handbook**. 4ª Edição. ASM, Metals Park, 1990.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 6207**. Arame de Aço Ensaio de Tração. ABNT, 1982.
- [11] O Ensaio Metalográfico. **Controle da qualidade**. Disponível em [http://www.spectru.com.br/ensaio\\_metal.pdf](http://www.spectru.com.br/ensaio_metal.pdf). Acessado em 10 de Outubro de 2014.
- [12] Metalografia preparação de amostras. **Uma abordagem prática**. Disponível em <http://www.urisan.tche.br/~lemm/metalografia.pdf>. Acessado em 29 de Outubro de 2014.

[13] CAMARGO, S M; GUIMARÃES FILHO, M A; LOPES, R L; SANTOS, C de P; NOBRE, A J. **Tratamentos térmicos: normalização, têmpera e revenido do aço 1140 fabricado em siderúrgica de Marabá-Pa.** 2012 CONEM. São Luis, MA. Agosto 2012.

[14] Diagrama de Fases. Disponível em <http://www.dema.pucrio.br/cursos/cematmv/Aula12.pdf>. Acessado em 25 de Outubro de 2014.

[15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 148 - 2.** Ensaio de impacto por pêndulo Charpy. ABNT, 2013.