



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

**NOELE MALAQUIAS MARINHO**

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE UM AÇO ASTM A36**  
**SUBMETIDO A TRATAMENTOS TERMOQUÍMICO E TÉRMICO**

**MARABÁ-PA**

**2018**

NOELE MALAQUIAS MARINHO

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE UM AÇO ASTM A36  
SUBMETIDO A TRATAMENTOS TERMOQUÍMICO E TÉRMICO**

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. Me. Márcio Paulo de Araújo Mafra.

Coorientador: Prof. Me. José Charles Moraes de Oliveira.

**MARABÁ-PA**

**2018**

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**Biblioteca II da UNIFESSPA. CAMAR, Marabá, PA**

---

Marinho, Noele Malaquias

Avaliação da resistência ao impacto de um aço ASTM A36 submetido a tratamentos termoquímico e térmico / Noele Malaquias Marinho; orientador, Márcio Paulo de Araújo Mafra, coorientador, José Charles Moraes de Oliveira. — 2018.

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, 2018.

1. Aço - Tratamento térmico. 2. Resistência de materiais. 3. Aço - Teste. 4. Metais - Propriedades mecânicas. I. Mafra, Márcio Paulo de Araújo, orient. II. Oliveira, José Charles Moraes de, coorient. III. Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará. IV. Título.

CDD: 22. ed.: 669.1

---

Elaborado por Nádia Lopes Serrão  
Bibliotecária-Documentalista CRB2/575

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE UM AÇO ASTM A36  
SUBMETIDO A TRATAMENTOS TERMOQUÍMICO E TÉRMICO**

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. Me. Márcio Paulo de Araújo Mafra.

Coorientador: Prof. Me. José Charles Moraes de Oliveira.

Data de aprovação: 21 / 12 / 2018

Conceito: EXCELENTE

Bancada Examinadora:



---

Prof. Me. Márcio Paulo de Araújo Mafra  
Unifesspa / Femat / Orientador



---

Prof. Me. José Charles Moraes De Oliveira  
Unifesspa / Femat / Coorientador



---

Prof. Dr. Elias Fagury Neto  
Unifesspa / Femat / Membro

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, pois sem ele nada seria possível, somente através de seu amor foi possível a realização desse sonho.

Agradeço de modo especial a minha mãe Maria Helena, pela sua dedicação e apoio, passou por grandes dificuldades, mas sempre fez o possível para que o meu sonho se tornasse realidade.

Ao meu namorado Welvis, que além de permanecer ao meu lado em muitos momentos difíceis, me deu forças para continuar sempre me alegrando. Obrigada pela compreensão, apoio e incentivo.

Agradeço aos amigos que a Femat me trouxe. Alan dos Anjos, Fernando Dias Deyrlanne Alchaar, obrigada pelo apoio e companheirismo que suavizou muito essa jornada.

Aos professores Márcio Paulo de Araújo Mafra e José Charles Moraes de Oliveira pela orientação e apoio durante esse trabalho, por todo conhecimento que foi a mim transmitido.

Agradeço a professora Camila Torres, que foi de suma importância para o meu aprendizado, dentro e fora de sala de aula.

Aos professores da Femat, que participaram da minha formação e a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para essa conquista, sou imensamente grata.

Agradeço a Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará pela estrutura disponibilizada.

## RESUMO

A necessidade de se estudar processos de tratamento térmico para aços comuns de baixa porcentagem carbono, deve-se à baixa temperabilidade e por apresentarem uma alta redução de tenacidade. O estudo dos aços vem crescendo amplamente, por possuírem propriedades interessantes à engenharia, como: excelente trabalhabilidade, alta capacidade para usinagem, alta conformabilidade, alta soldabilidade e principalmente um baixo custo para a indústria. O aço ASTM A36 é diferenciado de outros aços, pois possui propriedades mecânicas bem delimitadas. Os tratamentos térmicos modificam, em maior ou menor escala, a estrutura dos aços, resultando, em consequência na alteração de suas propriedades. O objetivo desse trabalho é a análise da resistência ao impacto de um aço ASTM A36 submetido ao tratamento termoquímico de cementação e pós-tratamentos de têmpera e revenido, considerando a temperatura fixa para cementação e têmpera e variando-se a temperatura de revenido e tempo de têmpera. Para as análises experimentais, foram confeccionados 30 corpos de provas para os ensaios de metalografia, impacto (com as dimensões definidas pela norma internacional ASTM E23-94a) e dureza. Os resultados obtidos por meio dessas análises, permitiram concluir que a condição 5 (cementação a 950 °C durante 5 horas, têmpera a 850 °C durante 60 minutos e revenido a 250 °C durante 60 minutos) apresentou menor valor no ensaio de impacto (consequentemente menor valor de resistência ao impacto) e maior valor no ensaio de dureza, além de apresentar em sua microestrutura a formação de grãos martensíticos, confirmando assim o aumento de dureza do material. A condição 5 sofreu um revenimento de 250 °C, essa temperatura não confere ao material grandes transformações nem alívios de tensões, possuindo então menor resistência ao impacto, acarretando em menor absorção de energia.

**Palavras-chave:** Cementação, tenacidade ao impacto, têmpera, revenido.

## ABSTRACT

The need for study heat treatment processes for common low carbon steels are due to the low temperability and to have a high reduction of tenacity. The study of steels has been growing widely, because they have interesting properties for engineering, such as: excellent workability, high machining capacity, high formability, high weldability and especially a low cost for the industry. ASTM A36 steel is differentiated from other steels because it has well delimited mechanical properties. The thermal treatments modify, to a greater or smaller scale the structure of the steels, resulting, consequently in the alteration of its properties. The objective of this work is the analysis of the impact resistance of an ASTM A36 steel subjected to the thermochemical treatment of cementation and post-treatments of quenching and tempered, considering the fixed temperature for cementation and quenching and varying the tempered temperature and quenching time. For the experimental analyzes, 30 test bodies were prepared for metallography, impact tests (with dimensions defined by international standard ASTM E23-94a) and hardness. The results obtained through these analyzes allowed us to conclude that condition 5 (cementation at 950 °C for 5 hours, quenching at 850 °C for 60 minutes and tempered at 250 °C for 60 minutes) presented lower value in the impact test (consequently lower value of impact resistance) and higher value in the hardness test, besides presenting in its microstructure the formation of martensitic grains, thus confirming the increase in hardness of the material. Condition 5 has a tempering of 250 °C, this temperature does not give the material large transformations or stress relieving, thus having less impact resistance, resulting in lower energy absorption.

**Keywords:** Cementation, impact resistance, temper, quenching.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama ferro-carbono.....	18
Figura 2 - Representação esquemática do tratamento térmico de têmpera .....	24
Figura 3 - Severidade de têmpera de diferentes meios comparados com a água .....	26
Figura 4 - Primeiro estágio: cobertura de vapor sobre a peça em resfriamento .....	27
Figura 5 - Segundo estágio: ebulição do meio de resfriamento .....	28
Figura 6 - Terceiro estágio: resfriamento convectivo.....	28
Figura 7 - Representação gráfica dos ciclos térmicos de têmpera e revenido.....	29
Figura 8 - Martensita (a) em ripas (C=0,13%) e (b) em placas (C=0,27%).....	31
Figura 9 - Representação do equipamento de ensaio de impacto.....	32
Figura 10 - Corpos de prova Charpy, segundo a ASMT E23 - 94a. ....	33
Figura 11 - Ilustração ensaio de dureza Rockwell.....	35
Figura 12 - Fluxograma esquemático dos processos efetuados sobre as amostras .....	36
Figura 13 - Amostras distribuídas na caixa metálica.....	38
Figura 14 - Peças cobertas com última camada de pó cementante, carbonato, aglutinante ....	39
Figura 15 - Peças cobertas com sílica.....	39
Figura 16 - Caixa metálica de cementação dentro do forno.....	40
Figura 17 - Caixa metálica resfriando ao ar .....	41
Figura 18 - Copos de prova após têmpera.....	42
Figura 19 - Amostras embutidas.....	43
Figura 20 - Dimensões corpo de prova Charpy.....	44
Figura 21 - Corpos de prova para ensaio de impacto.....	44
Figura 22 - Equipamento de ensaio de impacto .....	45
Figura 23 - Posicionamento do corpo de prova.....	45
Figura 24 - Durômetro Rockwell.....	47
Figura 25 - Condição 1 (sem tratamento): (a) centro e (b) borda da amostra. Ataque Nital 2%. .....	49
Figura 26 - Condição 2 (30 min Têmpera; 450 °C Revenido): (a) centro e (b) borda da amostra. Ataque Nital 2%.....	50
Figura 27 - Condição 3 (60 min Têmpera; 450 °C Revenido): (a) centro e (b) borda da amostra. Ataque Nital 2%.....	50
Figura 28 - Condição 4 (30 min Têmpera; 250 °C Revenido): (a) centro e (b) borda da amostra. Ataque Nital 2%.....	51

Figura 29 - Condição 5 (60 min Têmpera; 250 °C Revenido): (a) centro e (b) borda da amostra. Ataque Nital 2% .....	52
Figura 30 - Micrografia da matriz da amostra da condição 4, que representa a matriz de todas as condições. A matriz é formada por ferrita e cementita. Ataque Nital 2% .....	52
Figura 31 - Resultado das energias absorvidas.....	53
Figura 32 - Energias absorvidas pelas amostras tratadas .....	54
Figura 33 - Superfície de fratura da condição 1 .....	55
Figura 34 - Superfície de fratura: (a) condição 2; (b) condição 3 .....	56
Figura 35 - Superfície de fratura: (a) condição 4; (b) condição 5. Aumento 1000x. ....	56
Figura 36 - Gráfico de dureza comparando todas as condições .....	58
Figura 37 - Gráfico de dureza, resistência ao impacto e temperatura de revenido.....	59
Figura 38 - Comparação da dureza e resistência ao impacto .....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos aços-carbono quanto à composição .....	20
Tabela 2 - Composição química do aço ASTM A36 (valores em %) .....	21
Tabela 3 - Composição química (em %) do aço ASTM A36.....	36
Tabela 4 - Distribuição dos tratamentos (condições utilizadas) .....	37
Tabela 5 - Proporção dos elementos usados na cementação .....	38
Tabela 6 - Composição química (em %) das amostras.....	48
Tabela 7 - Energia absorvida, em joules, pelos corpos de prova após ensaio de impacto .....	53
Tabela 8 - Dureza das amostras .....	57

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials
<b>ASTM E23 - 94a</b>	Norma de padronização de corpos de prova Charpy
<b>AISI</b>	American Iron and Steel Institute
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Óxido de alumínio (alumina)
<b>C</b>	Carbono (elemento químico)
<b>CCC</b>	Cúbico de corpo centrado
<b>CFC</b>	Cúbico de face centrada
<b>Cr</b>	Cromo (elemento químico)
<b>Cu</b>	Cobre (elemento químico)
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono
<b>CO</b>	Monóxido de carbono
<b>CaCl</b>	Cloreto de cálcio
<b>EUA</b>	Estados Unidos da América
<b>F<sub>0</sub></b>	Pré-carga
<b>Fe</b>	Ferro (elemento químico)
<b>Fe-C</b>	Ferro-carbono
<b>Fe<sub>3</sub>-C</b>	Cementita
<b>Fe-Fe<sub>3</sub>C</b>	Ferro carboneto de ferro
<b>Fe-Ni</b>	Ferro-níquel
<b>Femat</b>	Faculdade de Engenharia de Materiais
<b>Hq</b>	Altura inicial
<b>hr</b>	Altura menor
<b>HB</b>	Dureza Brinell
<b>HRB</b>	Dureza Rockwell na escala B
<b>HRC</b>	Dureza Rockwell na escala C
<b>J</b>	Joules
<b>Kgf</b>	Quilograma força
<b>Kgf/mm<sup>2</sup></b>	Quilograma força por milímetro quadrado
<b>Kgf/m<sup>2</sup></b>	Quilograma força por metro quadrado
<b>mm</b>	Milímetro
<b>MPa</b>	Megapascal
<b>Mo</b>	Molibdênio (elemento químico)

<b>NaCl</b>	Cloreto de sódio
<b>Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></b>	Carbonato de sódio
<b>Nital 2%</b>	Solução de ácido nítrico a 2% + álcool
<b>Ni</b>	Níquel (elemento químico)
<b>O<sub>2</sub></b>	Oxigênio elementar
<b>P</b>	Fósforo (elemento químico)
<b>SAE</b>	Society of Automotive Engineers
<b>Si</b>	Silício (elemento químico)
<b>S</b>	Enxofre (elemento químico)
<b>TTT</b>	Tempo-temperatura-transformação
<b>TRC</b>	Transformação-no-resfriamento contínuo
<b>TCC</b>	Tetragonal de corpo centrado
<b>Unifesspa</b>	Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará
<b><math>\alpha</math></b>	Ferrita
<b><math>\gamma</math></b>	Austenita
<b><math>\delta</math></b>	Ferrita delta
<b><math>\mu</math></b>	Micro ( $10^{-6}$ )
<b>°C</b>	Graus célsius

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	16
2.1 GERAL.....	16
2.2 ESPECÍFICO.....	16
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	16
3.1 AÇOS .....	16
3.1.1 Diagrama ferro-carbono .....	17
3.1.2 Designação e classificação dos aços .....	20
3.1.3 Aço ASTM A36 .....	20
3.2 TRATAMENTO TERMOQUÍMICO DOS AÇOS .....	21
3.2.1 Cementação .....	21
3.3 TRATAMENTO TÉRMICO DOS AÇOS.....	22
3.3.1 Têmpera.....	23
3.3.2 Revenido .....	28
3.4 METALOGRAFICA DOS AÇOS .....	30
3.4.1 Martensita.....	31
3.5 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS .....	31
3.5.1 Tenacidade à fratura.....	32
3.5.2 Dureza .....	34
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	36
4.1 MATERIAIS .....	36
4.2 MÉTODOS.....	36
4.2.1 Preparação dos corpos de prova.....	37
4.2.2 Tratamento termoquímico e térmico.....	37
4.2.3 Análise química.....	42
4.2.4 Análise metalográfica.....	43
4.2.5 Ensaio de impacto .....	43

4.2.6 Ensaio de dureza .....	46
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>48</b>
5.1 ANÁLISE QUÍMICA .....	48
5.2 ANÁLISE METALOGRAFICA.....	49
5.3 ENSAIO DE IMPACTO .....	53
5.3.1 Análise de fratura .....	55
5.4 ENSAIO DE DUREZA.....	57
5.5 COMPARATIVOS .....	58
5.5.1 Dureza x resistência ao impacto x temperatura de revenido.....	58
5.5.2 Dureza x resistência ao impacto.....	59
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	<b>61</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>63</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os aços são os materiais industriais mais amplamente empregados no nosso dia a dia. O papel de destaque do aço é evidente. Possivelmente, o principal fator que levou o aço a ocupar este papel preponderante na engenharia é o amplo espectro de propriedades e características de desempenho que pode ser obtido a custos baixos, especialmente devido à disponibilidade de ferro no planeta terra e a extrema otimização dos processos de fabricação do aço (SILVA; MEI, 2010).

Segundo Chiaverini (2003) 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, adequando estas a determinadas aplicações sem que seja necessário gerar qualquer mudança na sua composição química.

O conjunto de propriedades mecânicas de um aço irá definir como esse material irá se comportar sob as solicitações mecânicas especificadas em projeto para aquele componente. As propriedades mecânicas dos aços dependem de sua microestrutura, que é condicionada pela composição química e pela sequência de tratamentos térmicos utilizados. As propriedades mecânicas dos aços podem ser avaliadas por meio de diferentes ensaios: tração, compressão, dureza, ensaio de impacto (SILVA; MEI, 2010).

A capacidade de resistência ao impacto está ligada à sua tenacidade, que por sua vez está relacionada com a sua ductilidade. O ensaio de impacto dá informações da capacidade do material absorver e dissipar essa energia, como resultado obtém-se a energia absorvida pelo material até sua fratura, caracterizando assim o comportamento dúctil ou frágil do material (PANDOLFO, 2009).

O aço ASTM A36 é chamado de aço estrutural de média e alta resistência mecânica, termo designativo de todos os aços que, devido à sua resistência, ductilidade e outras propriedades, são adequadas para a utilização em elementos da construção sujeitos a carregamento (BELGO, 2018).

No presente trabalho, utilizou-se um aço ASTM A36 para avaliar o comportamento microestrutural e mecânico após o tratamento de cementação, têmpera e revenido, em temperaturas e tempos variados, com o intuito de avaliar suas propriedades mecânicas.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 GERAL**

Avaliar a resistência ao impacto de um aço ASTM A36 submetido ao tratamento termoquímico de cementação e pós-tratamentos de têmpera e revenido.

### **2.2 ESPECÍFICO**

Avaliar o aumento do teor de carbono em um aço de baixo carbono.

Avaliar as mudanças microestruturais do aço ASTM A36 submetido ao tratamento termoquímico de cementação e pós-tratamentos de têmpera e revenido.

Avaliar o aumento da fragilidade do aço através do ensaio de impacto (Charpy) e o aumento de dureza através do ensaio de dureza.

Avaliar a relação de dureza versus a resistência ao impacto resultantes dos tratamentos.

## **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **3.1 AÇOS**

Uma definição mais geral do aço é aquela que trata esse material como liga ferro-carbono de baixo teor de carbono, contendo ainda impurezas e, em determinados casos, outros elementos adicionados como liga. Em função disso, visando uma definição melhor, podem ser considerados dois tipos fundamentais de aço: os aços-carbono comuns e os aços-liga (VAN VLACK, 1970).

Os aços-carbono comuns contêm, geralmente, 0,008% até aproximadamente 2,11% em peso de carbono, além de pequenas concentrações de certos elementos residuais resultantes dos processos de fabricação. A concentração de 0,008% em peso corresponde à máxima solubilidade do carbono no ferro à temperatura ambiente, e a concentração de 2,11% em peso corresponde à máxima quantidade de carbono que se dissolve no ferro, e ocorre a 1148 °C (CALLISTER, 2008).

### 3.1.1 Diagrama ferro-carbono

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 (CALLISTER, 2012).

De todos os sistemas de ligas binárias, aquele que é possivelmente o mais importante é o formado pelo ferro e o carbono. Tanto os aços como os ferros fundidos, que são os principais materiais estruturais em toda cultura tecnologicamente avançada, são essencialmente ligas ferro-carbono (CALLISTER, 2012).

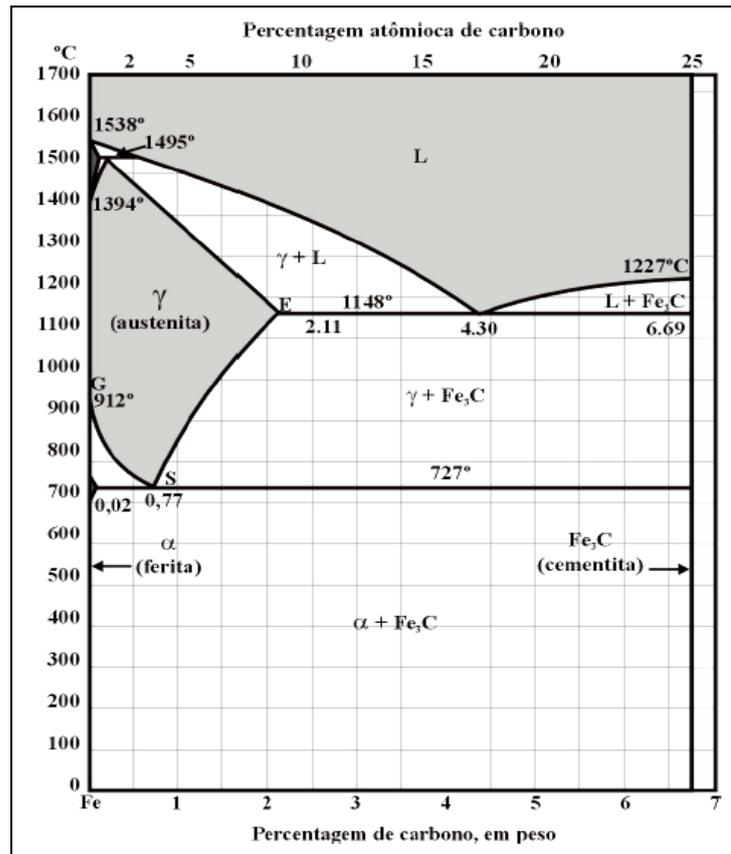
As ligas de ferro-carbono de interesse metalúrgico são aquelas cujo teor de carbono é inferior a 6,69%. O aço, composto por 0,02% a 2,11% de carbono, e o ferro fundido, de 2,11% a 6,69% de carbono, são as ligas mais importantes destes elementos. No aço, o carbono encontra-se combinado a uma parte do ferro formando o carboneto de ferro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), também chamado cementita, que contém 6,69% de carbono. No estado líquido, este carboneto encontra-se inteiramente dissolvido na massa líquida, formando uma solução homogênea. Ao solidificar-se, esta solução permanece homogênea devido à propriedade do ferro gama em poder manter uma solução sólida mais extensa com o carbono, denominada austenita ( $\gamma$ ) (SHACKELFORD, 1999).

A linha GSE e a horizontal de 727 °C do diagrama da Figura 1 marca o início e o término das modificações da textura do aço, quando aquecidos ou resfriados. Se resfriados lentamente, esta textura se conserva até a temperatura ambiente, caso contrário, têm-se texturas compostas. Estas linhas delimitam o que se chama de zona crítica. Como a solubilidade do carbono no ferro gama é limitada, de 2,11% a 1148 °C e, de 0,77% a 727 °C, à medida que se resfria a liga, o carbono passa a precipitar-se nos contornos de grãos de austenita, por difusão, até ocorrer a transformação alotrópica do ferro gama em ferro alfa, a 727 °C. Como o ferro alfa (ferrita) forma uma solução pouco extensa com o carbono, ao passar pela horizontal de 727 °C, a austenita transforma-se em perlita, grãos lamelares de ferro alfa e carboneto em camadas finas e alternadas. Para os aços resfriados lentamente, abaixo da horizontal de 727 °C temos (SHACKELFORD, 1999):

- Até 0,77% C: aços hipoeutetóides, a ferrita isola-se ou precipita-se junto aos contornos de grãos de austenita resultando em ferrita + perlita;

- Com 0,77% C: aços eutetóides, a ferrita formada envolve a austenita formando lamelas, ou seja, perlita;
- Com 0,77% a 2,11%: aços hipereutetóides, forma-se a perlita envolvida por carbonetos precipitados resultando em perlita + cementita.

Figura 1 - Diagrama ferro-carbono.



Fonte: SHACKELFORD, 1999.

Este diagrama é geralmente apresentado somente até o teor de 6,67% de carbono por dois motivos. O primeiro, é que este elemento forma com o ferro o composto Fe<sub>3</sub>C que contém 6,67% de carbono e que é um constituinte de grande importância nas ligas ferro-carbono. O segundo motivo é o fato de pouco ou nada se conhecer dessas ligas acima desse teor. Como a extremidade direita do diagrama Fe-C corresponde a 6,67% de carbono, que é a composição do carboneto de ferro Fe<sub>3</sub>C, este diagrama é, de fato, um diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C (ASKELAND; PHULÉ, 2003).

Segundo Chiaverini (2012) na verdade, não se trata a rigor de um diagrama de equilíbrio estável, pois se assim fosse não deveria ocorrer qualquer mudança de fase com o tempo. Verificou-se, entretanto, que mesmo em ligas Fe-C relativamente puras (isto é, com

baixos teores de elementos residuais), mantidas durante anos a temperaturas elevadas (da ordem de 700 °C), o Fe<sub>3</sub>C pode se decompor em ferro e carbono, este último na forma de grafita.

### 3.1.1.1 Fases presentes no diagrama ferro-carbono

Observa-se no diagrama a existência de quatro fases: as soluções sólidas  $\alpha$ ,  $\gamma$  e  $\delta$  e o composto intermetálico Fe<sub>3</sub>C (PUKASIEWICZ, 2003).

- Fase  $\alpha$ : denominada ferrita, esta fase é uma solução sólida intersticial de carbono em ferro  $\alpha$ , apresentando, portanto, estrutura CCC. A solubilidade do carbono na ferrita é muito baixa, pois apenas alguns átomos de carbono poderão ocupar os sítios da estrutura CCC do ferro. Em função dessa baixa solubilidade de carbono, a ferrita é a mais macia e dúctil das fases mostradas no diagrama Fe-C. À temperatura ambiente apresenta limite de resistência na ordem de 340 MPa (35 kgf/mm<sup>2</sup>), alongamento de 70% e dureza Brinell entre 50 e 100. É ferromagnética a temperaturas inferiores a 760 °C (PUKASIEWICZ, 2003).

- Fase  $\gamma$ : denominada austenita, esta fase é uma solução sólida intersticial de carbono em ferro  $\gamma$ , em que os átomos de carbono ocupam sítios octaédricos da rede do ferro com estrutura CFC. Os sítios intersticiais do ferro  $\gamma$  são maiores que os da ferrita; em consequência, a solubilidade do carbono será muito mais elevada na austenita do que na ferrita. Mesmo assim, o espaço vazio em cada sítio é insuficiente para acomodar o soluto sem que haja deformação da rede. Isto limita a solubilidade a um máximo de apenas 2,11% em peso de carbono ou 8,7% em átomo, na temperatura de 1146 °C. Como a solubilidade de carbono na austenita é bem maior do que na ferrita, as suas propriedades mecânicas, que dependem do teor de carbono, terão uma maior variação. Esta fase é geralmente macia e dúctil, embora menos que a ferrita, é tenaz, tem limite de resistência entre 686 e 980 MPa (70 a 100 kgf/mm<sup>2</sup>) e é não-magnética (PUKASIEWICZ, 2003).

- Fase  $\delta$ : às vezes chamada ferrita-delta, esta fase é semelhante à fase  $\alpha$ . A solubilidade do carbono na mesma é pequena, mas consideravelmente maior que na fase  $\alpha$ , devido à temperatura elevada, e atinge 0,10% em peso de carbono a 1492 °C (PUKASIEWICZ, 2003).

- Carboneto de ferro (Fe<sub>3</sub>C): denominada cementita, essa fase é um composto intermetálico. A composição da cementita corresponde à fórmula Fe<sub>3</sub>C, pois o reticulado

cristalino contém átomos de ferro e de carbono na proporção de 3 para 1. Apresenta uma estrutura cristalina ortorrômbica com doze átomos de ferro e quatro átomos de carbono por célula unitária, o que corresponde a um teor de carbono de 6,67% em peso. A cementita é uma fase extremamente dura (aproximadamente 650 HB), frágil, e tem um limite de resistência superior a 1960 MPa (cerca de 200 kgf/mm<sup>2</sup>) (PUKASIEWICZ, 2003).

### 3.1.2 Designação e classificação dos aços

Como mencionado anteriormente, as propriedades mecânicas dos aços são sensíveis ao teor de carbono, que é normalmente inferior a 1% em peso. Dessa forma, os aços podem ser classificados em grupos baseados em nos seguintes itens: composição, como aços-carbono e aços-liga; processo de acabamento, como aços laminados a quente ou aços laminados a frio; e forma do produto acabado, como barras, chapas grossas, chapas finas, tiras, tubos ou perfis estruturais. Uma das classificações mais generalizadas é a que considera a composição química dos aços, e dentre os sistemas de designação conhecidos são muitos utilizados o da AISI (American Iron and Steel Institute) e o da SAE (Society of Automotive Engineers). Outras designações adotadas são as da ASTM (American Society for Testing and Materials) (FREIRE, 1989).

Tabela 1- Classificação dos aços-carbono quanto à composição.

<b>Classificação</b>	<b>Teor de Carbono (%)</b>
Aço extra-doce	0,05 a 0,15
Aço doce	0,15 a 0,30
Aço meio-doce	0,30 a 0,40
Aço-meio duro	0,40 a 0,60
Aço duro	0,60 a 0,70
Aço extra-duro	0,70 a 1,00

Fonte: FREIRE, 1989.

### 3.1.3 Aço ASTM A36

A ASTM possui uma relação de especificações que descrevem os aços adequados para as diversas aplicações. Os aços ASTM A131, por exemplo, são aços estruturais de qualidade naval de alta resistência. Os aços ASTM A36 e A283 são aços para aplicação em componentes estruturais onde as propriedades físicas são bem definidas para permitirem sua utilização em projetos que exigem dobramento e boa soldabilidade. No sistema de

classificação ASTM os aços para uso estrutural são identificados pela letra A, seguida por dois, três ou quatro dígitos. Dessa forma o aço ASTM A36 é um aço carbono com finalidade de utilização estrutural e em aplicações comuns (FREIRE, 1989).

A ASTM A36 é uma norma de propriedade mecânica, onde os seus produtos visam fins estruturais, ela estipula os limites de escoamento (fase elástica), limite de resistência (fase plástica) e alongamento % (o quanto o produto alongou). A composição química da ASTM A36 visa atender as propriedades e para tanto estipula um manganês de 0,60% a 0,90% (BELGO, 2018).

Tabela 2 - Composição química do aço ASTM A36 (valores em %).

<b>Aço</b>	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cu</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>
ASTM A36	0,23 (máx)	0,40 (máx)	0,04 (máx)	0,050 (máx)	0,35 (máx)	0,35 (máx)	0,35 (máx)	0,05 (máx)

Fonte: BELGO, 2018.

## 3.2 TRATAMENTO TERMOQUÍMICO DOS AÇOS

O principal objetivo do tratamento termoquímico é aumentar a dureza e a resistência ao desgaste superficial, porém deixando o meio da peça tenaz para que possa ter outras aplicações, como o aumento da resistência da peça à fadiga e à corrosão. Há diferentes tipos de tratamentos termoquímicos, como: cementação, nitretação, cianetação, e boretação (SILVA; MEI, 2010).

### 3.2.1 Cementação

Cementação é um processo em que metais ferrosos são colocados em contato com ambiente rico em carbono, o que permite anexar carbono na superfície do metal por difusão, criando um gradiente de concentração de carbono entre a superfície e o interior do metal. A profundidade de penetração do carbono é dependente da temperatura, tempo e a composição do agente de cementação (DAVIS, 2005). Em outras palavras, a cementação é um processo termoquímico no qual ocorre o acréscimo de carbono a aços com baixo teor de carbono, causando a elevação aproximada de 1%, a uma profundidade estipulada (BAUMGARTEN; COSTA, 2003).

A cementação sólida ou em caixa é realizada inserindo a peça dentro da caixa feita em aço, e dentro desta caixa é colocado um pó cementante rico em carbono, geralmente compostos de carvão e ativadores que podem ser carbonatos alcalinos. Esta caixa é colocada dentro do forno com temperatura em torno de 900 °C, e ocorrem as seguintes reações (SILVA; MEI, 2010):

- O oxigênio presente no ar se combina com o carbono do carvão vegetal produzindo dióxido de carbono:



- O dióxido de carbono se une com o carbono do carvão, gerando monóxido de carbono:



- O monóxido de carbono se une com o ferro do aço, gerando mais CO<sub>2</sub>:



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 (GONÇALVES, 2014).

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 (CHIAVERINI, 1996).

### 3.3 TRATAMENTO TÉRMICO DOS AÇOS

Os aços são ainda as ligas metálicas que mais se prestam às operações de tratamento térmico, por que sua estrutura durante essas operações pode sofrer profundas modificações, acarretando em consequência, propriedades de alto significado para suas aplicações na indústria e na engenharia em geral (CHIAVERINI, 2003).

Existem basicamente três possibilidades de adequação das propriedades mecânica, físicas e tecnológicas dos materiais para aplicação em condições específicas de trabalho: (a) as operações nas quais se submete o material a uma deformação plástica (laminação,

trefilação, extrusão, estampagem, forjamento, etc.); (b) as operações em que trabalha-se a composição química dos materiais (aciaria, fundição, etc.); e (c) aquelas que utilizam um ciclo térmico, conhecidas como tratamento térmicos (têmpera, recozimento, normalização, etc.) (CALLISTER, 2008).

Tratamento térmico corresponde a um conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os materiais, sobretudo os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera do ambiente circunvizinho e, posteriormente, velocidade de resfriamento, com o objetivo de alterar as suas propriedades ou conferir-lhes características para melhor atender a situações específicas (CHIAVERINI, 2003).

De modo geral, o tratamento térmico consiste em aquecer e resfriar uma peça de metal para que ela atinja as propriedades mecânicas desejadas como dureza, elasticidade, ductilidade, resistência à tração, que são as chamadas propriedades mecânicas do metal. A peça adquire essas propriedades sem que se modifique o estado físico do metal (SENAI, 2009).

Os tratamentos térmicos são utilizados para obtenção de melhores propriedades dos materiais dependendo de suas aplicações como produto. Na obtenção de tais propriedades desses materiais o tratamento térmico é o conjunto de operações de aquecimento a que são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de esfriamento (CHIAVERINI, 1996).

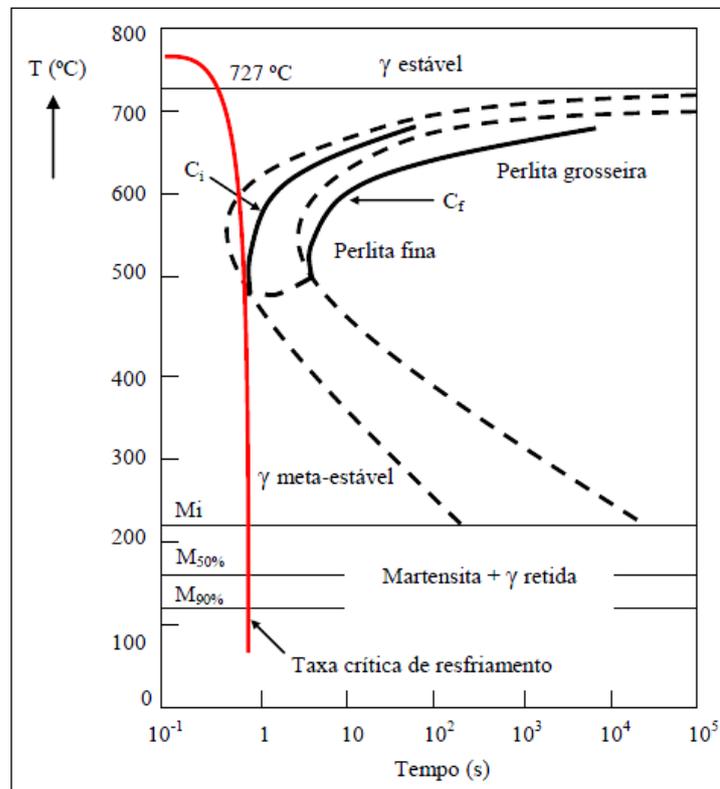
### 3.3.1 Têmpera

As propriedades mecânicas de um aço estão diretamente ligadas à sua microestrutura, que influencia na dureza, ductilidade, resistência mecânica e tenacidade. As diversas aplicações possíveis para um aço requerem diferentes combinações de características, que são possíveis de serem obtidas através de tratamentos que alterem as propriedades do aço, tornando mais efetiva e segura a sua aplicação. Tratamentos térmicos, como o de têmpera, são usados em larga escala para alterar a microestrutura e propriedades do aço para sua aplicação desejada. O objetivo principal da têmpera é aumentar a dureza e a resistência mecânica do aço, elevando-se a temperatura do aço para transformar sua estrutura em austenita, seguindo de resfriamento brusco, resultando na estrutura martensítica (CHIAVERINI, 2012).

### 3.3.1.1 Temperabilidade

A temperabilidade é uma propriedade das ligas ferrosas de se transformarem substancialmente em martensita a uma velocidade de resfriamento chamada crítica, a partir de uma temperatura elevada, ou seja, é a susceptibilidade ao endurecimento por têmpera. A temperabilidade indica a capacidade de o material ser transformado parcial ou totalmente, da fase austenítica para alguma porcentagem de martensita em uma dada profundidade, quando resfriado sob determinadas condições (PATROCÍNIO, 1999).

Figura 2 - Representação esquemática do tratamento térmico de têmpera.



Fonte: BRUNATTO, 2016.

### 3.3.1.2 Martensita

Segundo Krauss (2000) a martensita é uma fase produzida a partir da transformação adifusional da austenita no resfriamento. Essa transformação, geralmente conduzida através de um decréscimo brusco de temperatura é caracterizada pela ausência de tempo para os átomos de carbono e demais elementos de liga do metal se dividirem entre duas outras fases, ferrita e cementita, que seriam formadas em circunstâncias distintas, consideradas no

equilíbrio. Dessa forma, a fase desenvolvida apresenta a mesma composição química da anterior e, uma vez que os átomos de soluto são mantidos em solução, a estrutura cristalina apresentada é tetragonal de corpo centrado e saturada de carbono.

A martensita é uma fase metaestável, e entre as várias microestruturas que podem ser produzidas para uma dada liga de aço é a que possui maior dureza, entretanto a mais frágil (CHIAVERINI, 2012).

Para que a operação de têmpera seja bem sucedida, vários fatores devem ser levados em conta. Inicialmente, a velocidade de arrefecimento deve ser tal que impeça a transformação da austenita em altas temperaturas. De fato, essas transformações, se ocorrerem, resultam em estruturas mistas, as quais ocasionam o aparecimento de pontos moles, além de conferirem baixos valores para o limite de escoamento e para a resistência ao choque. Portanto, a seção da peça constitui outro fator importante porque pode determinar diferenças de esfriamento entre a superfície e o centro (CHIAVERINI, 2003).

Neste contexto outras ferramentas importantes, são os diagramas ou curvas tempo-temperatura-transformação (TTT) e de transformação-no-resfriamento contínuo (TRC), que exibem as transformações da austenita em função do tempo em temperaturas constantes, e em função de diferentes taxas de resfriamento (KRAUSS, 2000).

### *3.3.1.3 Meios de resfriamento e severidade de têmpera*

A severidade do tratamento térmico se refere aos meios de resfriamento do metal e à habilidade do fluido na extração de calor do aço aquecido. Quanto maior a severidade do meio maior será a distorção da peça (PATROCÍNIO, 1999). Os meios mais comuns de resfriamento são líquidos ou gasosos. No caso dos meios líquidos, os mais comumente usados são (CALLISTER, 2008):

Figura 3 - Severidade de têmpera de diferentes meios comparados com a água.

Meio de têmpera	Severidade de têmpera (H)	 Crescem: Velocidade de resfriamento Trincas Distorção
Óleo sem agitação	0,2	
Óleo moderadamente agitado	0,5	
Óleo violentamente agitado	0,7	
Água sem agitação	1,0	
Água fortemente agitada	1,5	
Salmoura sem agitação	2,0	
Salmoura fortemente agitada	5,0	

Fonte: COLPAERT, 2008.

As soluções aquosas constituem os meios mais drásticos de resfriamento e são igualmente os de menor custo. Assim, são os meios preferidos, desde que as peças apresentem formas que não provoquem excessivo empenamento ou mesmo trincas durante a têmpera (CHIAVERINI, 2003).

O termo salmoura ("brine quenching") refere-se à solução aquosa contendo diferentes quantidades de cloreto de sódio (NaCl) ou cloreto de cálcio (CaCl). As concentrações de NaCl variam entre 2 á 25%, entretanto, utiliza-se como referência a solução contendo 10% de NaCl. As taxas de resfriamento da salmoura são superiores às obtidas em água pura para a mesma agitação (KNOLL, 2009).

A velocidade de resfriamento dessas soluções é maior que a da água, pois, os minúsculos cristais de sal presentes na salmoura que entram em contato com a peça, fragmentam-se violentamente, causando mais agitação que acaba com o filme de vapor na superfície da peça, o que resulta a velocidades de resfriamento maiores. Devido à alta velocidade de resfriamento a salmoura é recomendada para aços com baixa temperabilidade e de geometria simples. As salmouras possuem desvantagens por serem corrosivas, necessitando de equipamentos para manuseio e armazenamento (DE SOUSA, 2007).

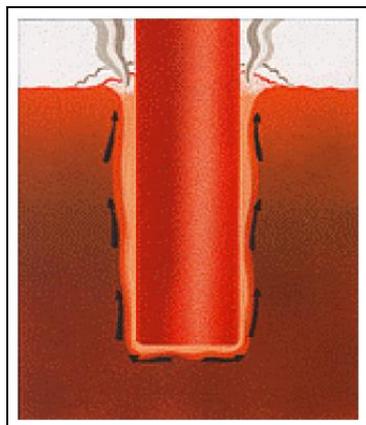
#### 3.3.1.4 Mecanismo de resfriamento

É importante conhecer os mecanismos de têmpera e os fatores que afetam o processo uma vez que estes fatores podem ter uma significativa influência na seleção do meio de

resfriamento, na severidade e no tipo deste. A forma na qual se processa o resfriamento durante o processo de têmpera em água, óleo ou solução aquosa de polímeros é similar, e ocorre em três estágios (HOUGHTON, 2018):

- Cobertura de vapor: é caracterizado pela formação de uma camada (filme) de vapor em torno do metal aquecido. Esta camada de vapor, figura 4, mantém-se enquanto a quantidade de calor emanada do interior para a superfície da peça exceder a quantidade necessária para evaporar o meio refrigerante e manter a fase de vapor. Este filme atua como um isolador e começa a desaparecer quando a temperatura de Leidenfrost é atingida (temperatura na qual o vapor é mantido). A transição do estágio A para o B ocorre através de repetidas ondas que atingem a superfície da peça nesta temperatura e independe da temperatura inicial da peça. Este é um período de resfriamento relativamente lento, onde a transferência de calor ocorre por radiação e condução através da camada de vapor (HOUGHTON, 2018);

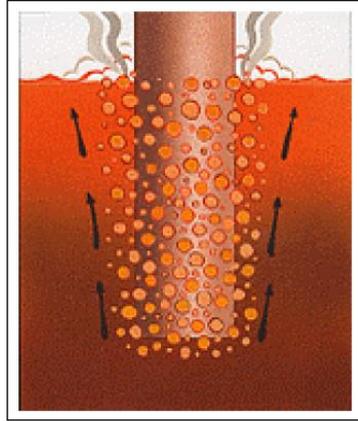
Figura 4 - Primeiro estágio: cobertura de vapor sobre a peça em resfriamento.



Fonte: HOUGHTON, 2018.

- Borbulhamento: caracteriza-se pela ebulição violenta na interface peça/meio. O eventual colapso da camada de vapor provoca o contato do metal com o meio refrigerante provocando altas taxas de transferência de calor e a evaporação do líquido, ocasionando o borbulhamento do vapor (HOUGHTON, 2018);

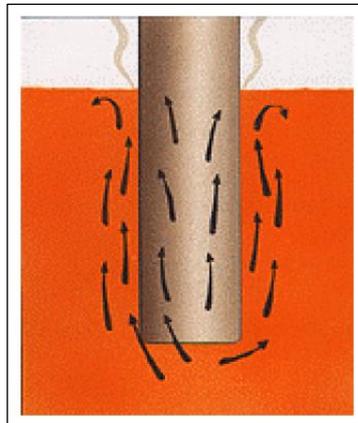
Figura 5 - Segundo estágio: ebulição do meio de resfriamento.



Fonte: HOUGHTON, 2018.

- Resfriamento convectivo: neste estágio, a superfície do material está numa temperatura inferior ao ponto de evaporação do meio refrigerante, que permite o total envolvimento pelo meio. O resfriamento dá-se de forma convectiva sendo função da temperatura de ebulição do meio de resfriamento. É o estágio de menor taxa de resfriamento (HOUGHTON, 2018).

Figura 6 - Terceiro estágio: resfriamento convectivo.



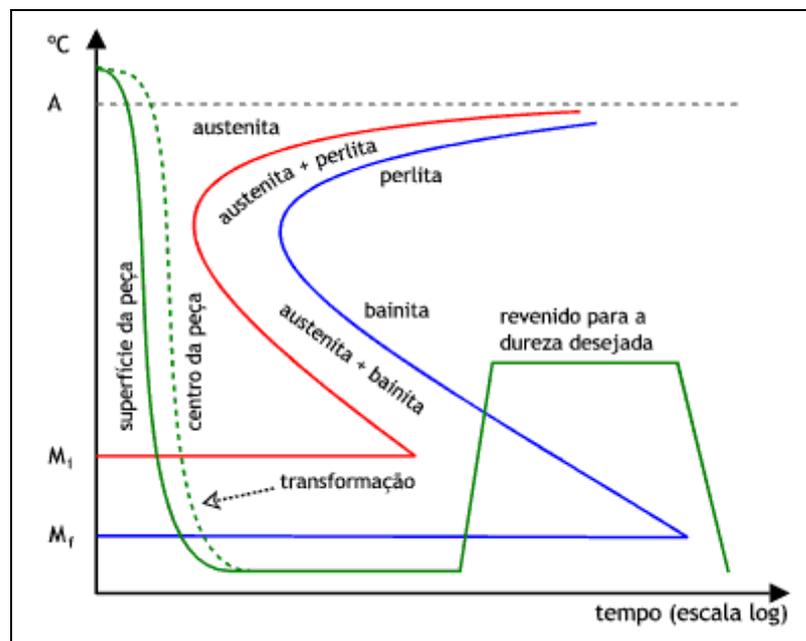
Fonte: HOUGHTON, 2018.

### 3.3.2 Revenido

O revenimento é o tratamento térmico que, via de regra acompanha a têmpera, pois elimina a maioria dos inconvenientes produzidos por esta. Além de aliviar ou remover as tensões residuais, possibilita ajustar a dureza e diminuir a fragilidade do material, aumentando sua resistência ao choque. Este tratamento consiste em aquecer os aços temperados, a

temperaturas abaixo do limite inferior da zona crítica (linha A, abaixo de 727 °C) permanecendo nestas temperaturas durante o tempo de encharque e posterior resfriamento ao ar. O aquecimento do material fornece a energia térmica necessária para a transformação de parte do reticulado instável, martensita, em produtos mais estáveis, tais como ferrita e cementita, produzindo também ajustamentos internos que aliviam as tensões residuais e a instabilidade dimensional, tudo isso em função da temperatura e do tempo de encharque (KRAUSS, 2000).

Figura 7 - Representação gráfica dos ciclos térmicos de têmpera e revenido.



Fonte: CALLISTER, 2000.

A temperatura de revenimento influirá no alívio das tensões de têmpera sendo maior ou menor conforme a temperatura seja mais alta ou mais baixa. Isto se relaciona diretamente com a dureza e a tenacidade do material; maior temperatura de revenimento significa maior alívio de tensões, mais ductilidade e, em relação aos aços carbono, menor dureza (KRAUSS, 2000).

A martensita produzida pela têmpera é muito frágil para uso comercial, sendo esta microestrutura caracterizada pelas altas tensões residuais internas. O revenido faz o reaquecimento desse material, permitindo que o reticulado instável TCC (tetragonal de corpo centrado) se transforme no CCC estável diminuindo essas tensões e produzindo uma estrutura nova chamada martensita revenida (DIAS, 2010).

Dependendo da temperatura, pequenas ou grandes transformações na estrutura martensítica resultam (CHIAVERINI, 2003):

- Revenimento entre 100 °C e 200 °C: não há transformações sensíveis. As estruturas, quando atacadas, apresentam aspecto mais claro, idêntico ao da martensita original (martensita branca), à temperatura mais baixa ou, às temperaturas mais elevadas, aspecto mais escuro. Essa última é comumente chamada de martensita revenida. As tensões começam a ser aliviadas. A dureza cai para 60 HRC (CHIAVERINI, 2003);
- Revenimento entre 200 °C e 260 °C: nessa faixa o aço começa a perder mais dureza, embora não se verifique nenhuma modificação estrutural notável (CHIAVERINI, 2003);
- Revenimento entre 260 °C e 360 °C: inicia-se uma precipitação de carbonetos finos, a qual origina uma estrutura com aparência de um agregado escuro onde ainda se nota a origem martensítica. A dureza continua caindo, chegando a valores de 50 HRC (CHIAVERINI, 2003);
- Revenimento entre 360 °C a 700 °C: nessa faixa ocorrem as maiores transformações estruturais e mecânicas. A dureza pode atingir valores de 30 HRC (CHIAVERINI, 2003).

Na realidade, existem duas faixas de temperatura favoráveis para o revenido dos aços, no sentido de melhorar sua tenacidade: 150 °C a 200 °C, na qual resulta apenas um ligeiro acréscimo de tenacidade (CHIAVERINI, 2003).

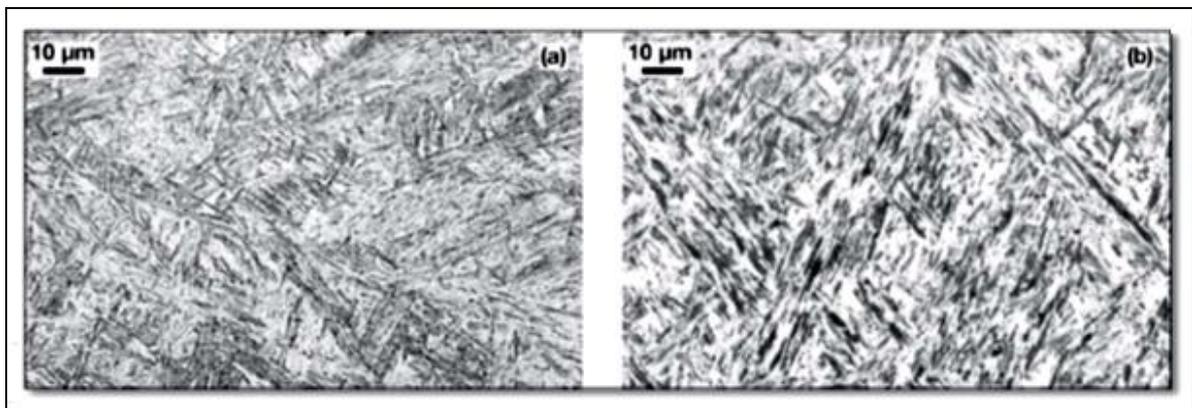
### 3.4 METALOGRAFICA DOS AÇOS

A metalografia é um recurso poderoso no desenvolvimento da pesquisa e no controle industrial. Embora muito se tenha feito nessa área, bons resultados permanecem dependentes da prática constante e da adaptação aos novos materiais que surgem. A correta caracterização da microestrutura de etapas intermediárias de processos de fabricação possibilita a correta modelagem e previsão da microestrutura final e conseqüentemente das propriedades requeridas (CAMPOS, 2004).

### 3.4.1 Martensita

A morfologia da martensita formada é afetada pelo teor de carbono, aços mais usuais para a construção mecânica (com até cerca de 0,6% C) apresentam martensita em pacotes de ripas, enquanto que aços mais ricos em carbono (e ligas Fe-Ni) apresentam martensita em placas. O aumento do teor de carbono no aço causa o abaixamento da temperatura de início de transformação martensítica (COLPAERT, 2008).

Figura 8 - Martensita (a) em ripas (C=0,13%) e (b) em placas (C=0,27%).



Fonte: COLPAERT, 2008.

## 3.5 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS

Segundo Callister (2012) muitos materiais, quando em serviço, são submetidos à forças ou cargas, e em tais situações é necessário conhecer as características do material. O comportamento mecânico de um material reflete a relação entre sua resposta ou deformação a uma carga ou força aplicada. Propriedades mecânicas importantes para o projeto são: rigidez, resistência, dureza, ductilidade e tenacidade. As propriedades mecânicas dos materiais são verificadas através da realização de ensaios em laboratório cuidadosamente planejados, que reproduzem as condições de serviço. O estabelecimento e a publicação de normas de padronização são coordenados por sociedades profissionais, nos EUA, por exemplo, a organização mais ativa é a Sociedade Americana para Ensaios e Materiais (ASTM, 2010).

O estudo dessas propriedades é necessário para o projeto de estruturas e componentes que utilizem materiais predeterminados, a fim de que não haja falhas dos componentes (HIBBELER, 2004).

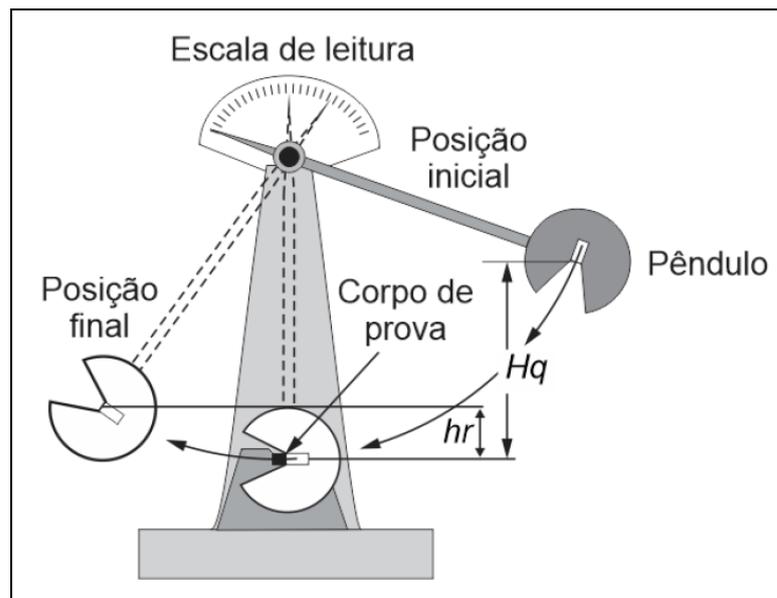
### 3.5.1 Tenacidade à fratura

A tenacidade representa uma medida da capacidade de um material em absorver energia até a fratura. Tenacidade à fratura é uma propriedade indicativa da resistência do material à fratura quando este possui uma trinca. Para que um material seja tenaz, ele deve apresentar tanto resistência como ductilidade, e frequentemente, materiais dúcteis são mais tenazes do que materiais frágeis. Embora o material frágil tenha maior limite de escoamento e maior limite de resistência à tração, ele possui menor tenacidade do que o material dúctil, em virtude de sua falta de ductilidade (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

#### 3.5.1.1 Ensaio de impacto

O ensaio de impacto é um ensaio dinâmico utilizado na análise de fraturas frágeis nos materiais, ele permite a constatação de diferenças de comportamento de materiais que não podem ser observadas em outros ensaios (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012). Os ensaios de impacto foram projetados e são utilizados até hoje para medir a energia que um material absorve antes de romper. Para o ensaio de impacto, o corpo de prova possui o formato de uma barra com seção transversal quadrada (CALLISTER, 2012).

Figura 9 - Representação do equipamento de ensaio de impacto.

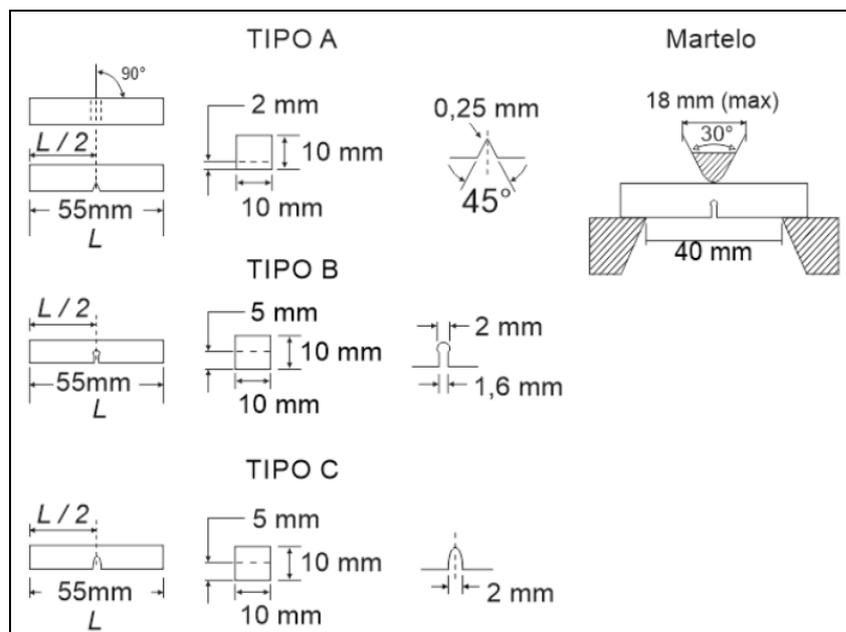


Fonte: GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012.

A carga de impacto é aplicada instantaneamente através de um martelo pendular que é liberado a partir de uma posição inicial ( $H_q$ ) conhecida. Após o martelo ser liberado, sua ponta se choca com o corpo de prova com um entalhe, que funciona como um concentrador de tensões. O pêndulo continua o movimento após o choque até uma altura ( $h_r$ ) menor que a altura inicial de liberação do martelo pendular ( $H_q$ ). A energia absorvida no impacto é determinada pela diferença de  $H_q$  e  $h_r$  (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

Os corpos de prova para ensaio de impacto Charpy são padronizados pela norma ASMT E23 - 94a, e são divididos em três tipos conforme a forma do seu entalhe. Assim, têm-se corpos de prova Charpy tipo A, onde o entalhe tem a forma de “V”, formando um ângulo de  $45^\circ$  e profundidade de aproximadamente 2 mm; tipo B, onde o entalhe cilíndrico é formado por um rasgo com um furo na extremidade, tem a forma de um buraco da chave de fechadura; e tipo C, onde o entalhe tem a forma de “U”, com diâmetro de 2 mm na ponta do entalhe e 5 mm de profundidade, como pode ser observado na Figura 10 (SOUZA, 1982). No ensaio de impacto Charpy o corpo de prova é apoiado horizontalmente, conforme pode ser observado no detalhe (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012). Os corpos de prova tipo A são normalmente empregados para materiais de menor resistência, o tipo B para materiais de média resistência e o tipo C para materiais de alta resistência (ALVES; TANIGUTE, 2011).

Figura 10 - Corpos de prova Charpy, segundo a ASMT E23 - 94a.



Fonte: SOUZA, 1982.

### 3.5.2 Dureza

Os aços são bastante utilizados na confecção de componentes mecânicos de máquinas, onde o carbono e outros elementos de liga desempenham um importante papel nas propriedades mecânicas. O aumento do teor de carbono nos aços promove aumento da dureza e resistência mecânica (SILVA; MEI, 2010).

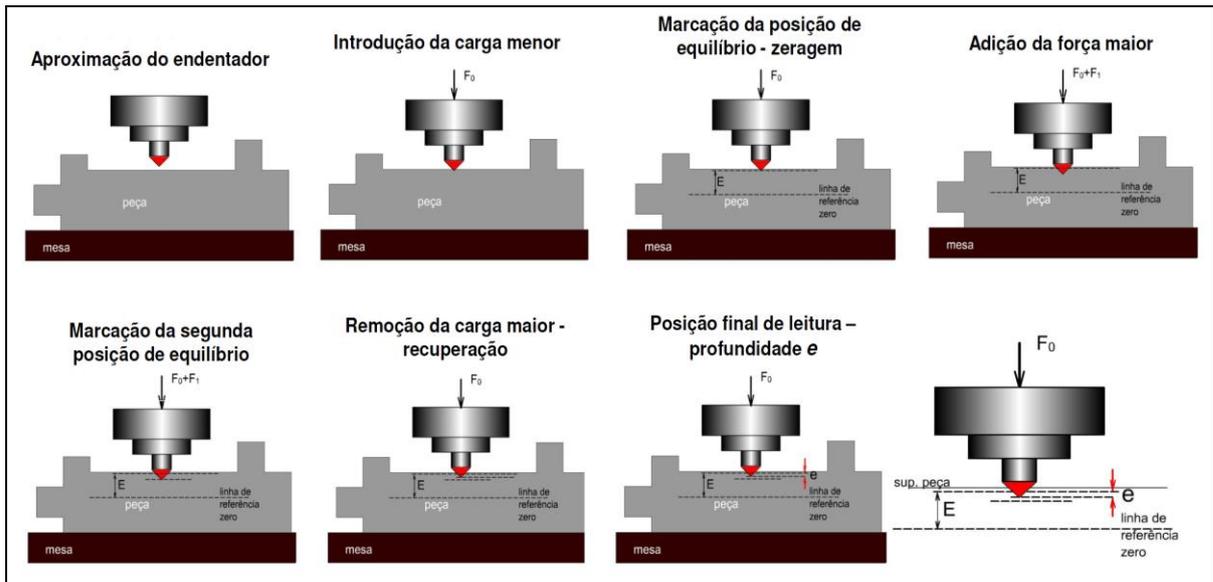
A dureza é uma propriedade mecânica cujo conceito se segue à resistência que um material, quando pressionado por outro material ou por marcadores padronizados, apresenta ao risco ou à formação de uma marca permanente. Os métodos mais aplicados em engenharia se utilizam de penetradores com formato padronizado 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 (PANDOLFO, 2009).

#### 3.5.2.1 Ensaio de dureza

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 (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

O ensaio de dureza Rockwell tem como principal objetivo endentar o material que está sofrendo o teste com um cone de diamante ou um endentador de esfera de aço endurecido. O endentador sofre uma força contra a superfície do corpo de prova com uma pré-carga chamada de  $F_0$ , normalmente se aplica 10 kgf. Quando se atinge o equilíbrio, um dispositivo indicativo da máquina que segue os movimentos do endentador e responde às variações da profundidade de penetração é levado para a posição zero. Ainda com uma pré-carga sendo executada, uma segunda carga é aplicada na ponta de teste resultando em um aumento na penetração. Novamente após o equilíbrio a carga é removida, mantendo-se a pré-carga, essa remoção da força aplicada (carga) resulta em uma recuperação parcial, reduzindo a profundidade da penetração. O aumento permanente na profundidade da penetração resultante da aplicação e remoção da carga é usado para calcular o valor da dureza Rockwell (GURU, 2018).

Figura 11 - Ilustração ensaio de dureza Rockwell.



Fonte: IFPA, 2005.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 MATERIAIS

O material utilizado para realização deste trabalho, conforme especificação da norma ASTM, foi o aço A36. Segundo dados do fabricante - Gerdau - sua composição química prevista é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química (em %) do aço ASTM A36.

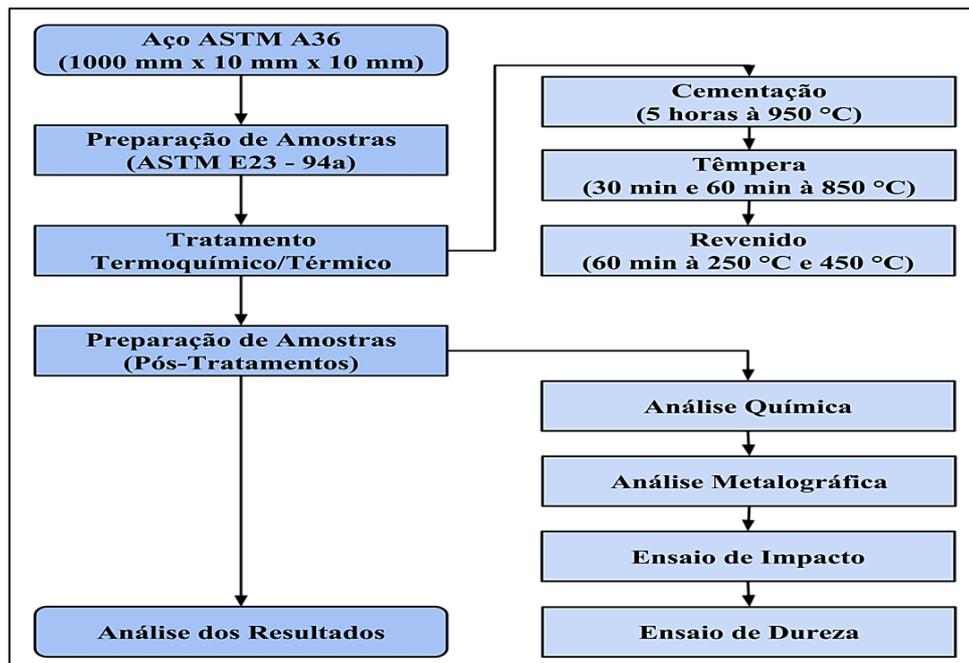
Aço	C	Mn	Si	Al	S	Cr	P	Ni	Ti	Nb
ASTM A36	0,14	0,63	0,21	0,020	0,007	0,01	0,011	0,01	0,001	0,001

Fonte: Gerdau, 2018.

### 4.2 MÉTODOS

Conforme mostra o fluxograma da Figura 12, realizou-se tratamento termoquímico de cementação, térmico de têmpera e revenido, em temperaturas e tempos variados. Após os ciclos térmicos analisou-se através de ensaios de impacto, dureza e metalográfico, as propriedades adquiridas pelos corpos de prova pós-tratamentos.

Figura 12 - Fluxograma esquemático dos processos efetuados sobre as amostras.



Fonte: Autor.

#### 4.2.1 Preparação dos corpos de prova

Antes de iniciar os ciclos de tratamentos, os corpos de prova foram cortados e as dimensões apropriadas foram baseadas na norma ASTM E23 - 94a. Após o corte as amostras seguiram para as etapas de tratamentos.

#### 4.2.2 Tratamento termoquímico e térmico

O tratamento termoquímico realizado nesse trabalho foi cementação sólida, seguido de tratamento térmico de têmpera e revenido. As amostras foram distribuídas de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 - Distribuição dos tratamentos (condições utilizadas).

<b>Condição</b>	<b>Tratamento</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Tempo</b>	<b>Corpo de Prova</b>
1	-	-	-	6
2	Cementação	950 °C	5 horas	6
	Têmpera	850 °C	30 min	
	Revenido	450 °C	60 min	
3	Cementação	950 °C	5 horas	6
	Têmpera	850 °C	60 min	
	Revenido	450 °C	60 min	
4	Cementação	950 °C	5 horas	6
	Têmpera	850 °C	30 min	
	Revenido	250 °C	60 min	
5	Cementação	950 °C	5 horas	6
	Têmpera	850 °C	60 min	
	Revenido	250 °C	60 min	

Fonte: Autor.

##### 4.2.2.1 Tratamento termoquímico de cementação

Antes de iniciar o tratamento de cementação foi preparado um pó cementante rico em carbono, carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) que é usado como ativador químico, melhorando assim a profundidade de penetração de carbono nas peças e, como aglutinante óleo de linhaça. A

composição dessa mistura é indicada na Tabela 5. As proporções em % foram realizadas tomando-se de base um total de 2 kg.

Tabela 5 - Proporção dos elementos usados na cementação.

<b>Pó Cementante (85%)</b>	<b>Carbonato (13,5%)</b>	<b>Material Aglutinante (1,5%)</b>
1534 g Grafite	270 g	30 g Óleo de Linhaça
166 g Carvão	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	

Fonte: Autor.

O pó cementante foi preparado para obter granulometria passante na peneira de 150 µm. Foi utilizado sílica (areia) para vedação. Esses dois últimos foram secos em estufa por 48 horas a temperatura de 100 °C, com o objetivo de retirar a umidade.

Foi adicionada uma camada de pó cementante no fundo de uma caixa metálica, posteriormente, todos os corpos de (Figura 13).

Figura 13 - Amostras distribuídas na caixa metálica.



Fonte: Autor.

Os corpos de provas foram distribuídos ao longo da caixa metálica, foram cobertos completamente por nova camada de pó cementante (Figura 14). Finalizou-se com uma camada de sílica para impedir o contato do pó cementante com oxigênio do ar (Figura 15).

Figura 14 - Peças cobertas com última camada de pó cementante, carbonato, aglutinante.



Fonte: Autor.

Figura 15 - Peças cobertas com sílica.



Fonte: Autor.

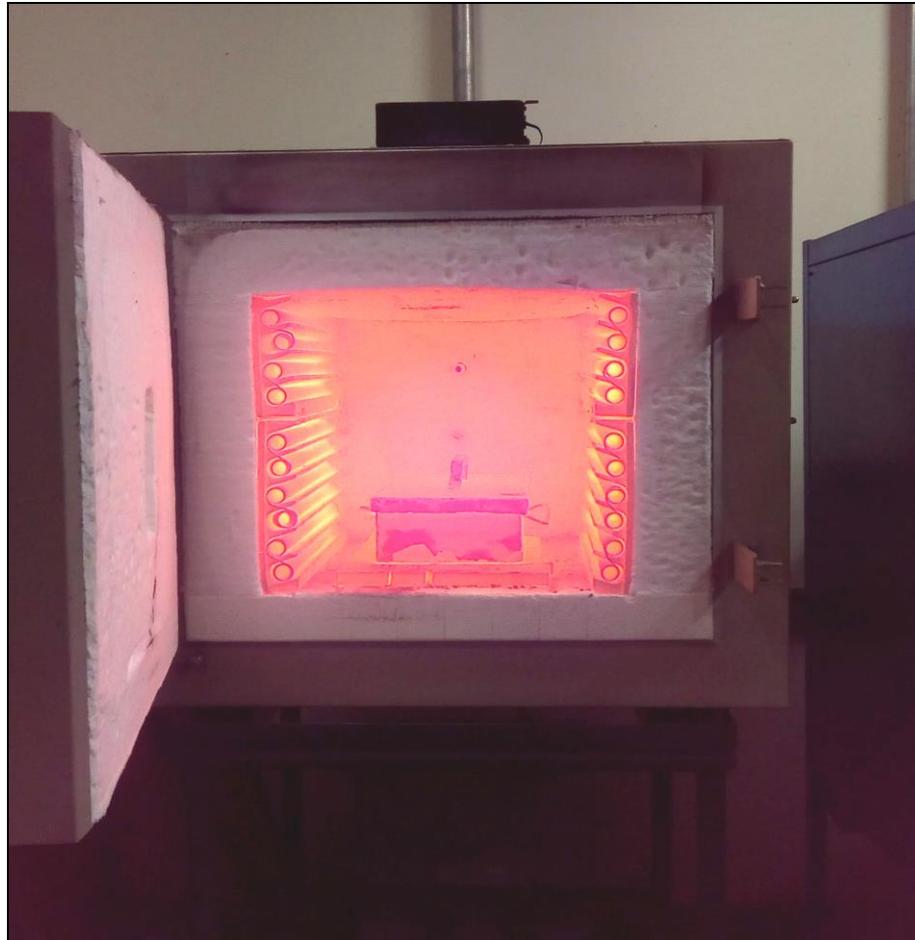
A caixa metálica contendo as amostras foi levada ao forno de resistência elétrica da marca Jung, após atingir a temperatura de 950 °C manteve-se a mesma dentro do forno durante 5 horas. Após o período de tempo estabelecido, a caixa foi retirada do forno e resfriada ao ar (Figura 16), até que atingisse rapidamente a temperatura de 650 °C (essa

redução de temperatura foi controlada com o auxílio de um termopar, da marca Ahlborn - Almemo 2590).

É preciso notar que a geração de quantidades apreciáveis de  $\text{CO}_2$  se dá a temperaturas elevadas, de modo que se deve evitar, após a cementação, resfriamento muito lento até  $650\text{ }^\circ\text{C}$ . Havendo formação de quantidade apreciável de  $\text{CO}_2$ , origina-se uma casca mole (CHIAVERINI, 2003).

Ao atingir  $650\text{ }^\circ\text{C}$ , a caixa metálica foi levada novamente ao forno para ser resfriada lentamente, permaneceu no interior do forno até o dia seguinte.

Figura 16 - Caixa metálica de cementação dentro do forno.



Fonte: Autor.

Figura 17 - Caixa metálica resfriando ao ar.



Fonte: Autor.

#### 4.2.2.2 Tratamento térmico de têmpera

Após a cementação os corpos de prova foram submetidos a uma têmpera de 850 °C, com tempos diferentes para a avaliação do grau da têmpera. O primeiro tempo foi de 30 minutos e o segundo foi de 60 minutos.

Os corpos de prova foram colocados dentro do forno e aquecidos até 850 °C, após 30 minutos, a metade (12 corpos de prova) foi retirada do forno e resfriada bruscamente em salmoura a temperatura ambiente. O mesmo procedimento foi realizado com a outra metade, foi resfriada bruscamente após 60 minutos de têmpera.

A composição da salmoura utilizada foi de 10 litros de água para 1 kg de sal (NaCl), que corresponde à 10%.

Na Figura 18 é possível notar a uma carepa formada nas amostras, após serem submetidas à têmpera em salmoura.

Figura 18 - Copos de prova após têmpera.



Fonte: Autor.

#### 4.2.2.3 Tratamento térmico de revenido

As amostras foram redistribuídas de acordo com Tabela 4, para realizar o tratamento pós-têmpera, conhecido como revenimento. Assim, 6 amostras temperadas a 850 °C durante 30 minutos foram revenidas a 450 °C durante 60 minutos; 6 amostras temperadas a 850 °C durante 60 minutos foram revenidas a 450 °C durante 60 minutos; 6 amostras temperadas a 850 °C durante 30 minutos foram revenidas a 250 °C durante 60 minutos e por último, 6 amostras temperadas a 850 °C durante 60 minutos foram revenidas a 250 °C durante 60 minutos.

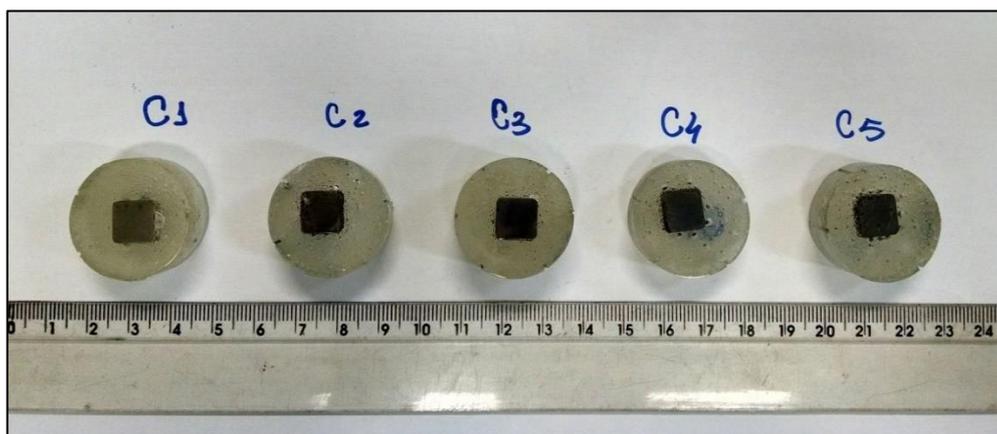
#### 4.2.3 Análise química

Foi realizada análise química através do ensaio de Espectrofotômetro da marca Bunker, que permitiu determinar quais são os elementos químicos presentes e quanto há de cada um deles no aço em estudo após os tratamentos. Para isso usou-se os métodos qualitativo e quantitativo. Essa análise foi realizada no laboratório de análises químicas da empresa Sinobras – Siderúrgica Norte Brasil S/A.

#### 4.2.4 Análise metalográfica

As amostras destinadas ao ensaio metalográfico foram embutidas a frio utilizando resina epóxi. Tomou-se 1 amostra de cada condição para a realização da análise (totalizando 5 amostras), cortou-se em dimensões de 10 mm x 10 mm x 10 mm. As amostras foram lixadas (com lixas granulação n° 600 a 1200), esse processo se iniciou na lixadeira manual, sob refrigeração com água, sempre girando a amostra 90° a cada substituição de lixa, finalizou-se com o polimento da amostra. As amostras foram polidas (com alumina a 0,3 $\mu$ ) e atacadas com Nital 2%, por aproximadamente 5 segundos. As amostras foram levadas ao microscópio da marca Zeiss, de luz direta com câmera digital embutida. Foram obtidas as micrografias das amostras em todas as condições de estudo, nos aumentos de 100x e 200x.

Figura 19 - Amostras embutidas.

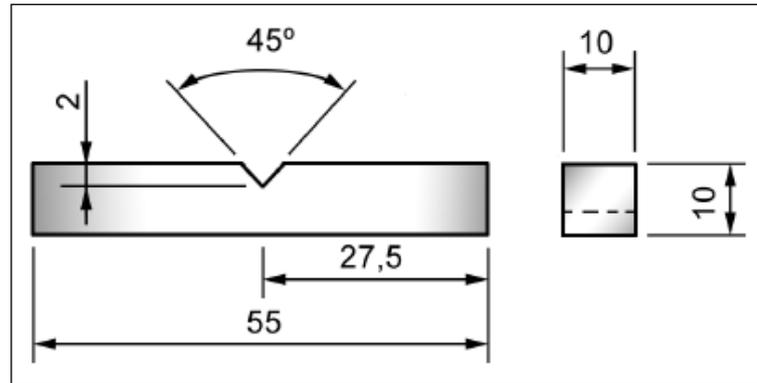


Fonte: Autor.

#### 4.2.5 Ensaio de impacto

As amostras foram confeccionadas a partir de uma barra com seção transversal quadrada, de dimensões: comprimento = 1000 mm, altura = 10 mm e largura = 10 mm. A barra foi cortada, usando o equipamento de esmerilhadeira, em comprimentos de 55 mm e em seguida foi realizado o chanfro em V a 45°. Os corpos de prova cortados foram lixados de maneira superficial, com lixa de granulação n° 80. O ensaio de impacto foi realizado com corpos de prova no tipo Charpy. Foram confeccionados 30 corpos de prova (6 corpos de prova para cada condição de estudo). As dimensões apropriadas dos corpos de prova para o ensaio de impacto são definidas pela norma ASTM E23 - 94a. A Figura 20 representa a geometria dos corpos de prova Charpy.

Figura 20 - Dimensões corpo de prova Charpy.



Fonte: ELCONIAN, 1988.

As amostras que sofreram tratamentos foram lixadas novamente, com lixa de granulação n° 320, com o intuito de retirar uma camada de óxido formada durante a têmpera (Figura 18).

Figura 21 - Corpos de prova para ensaio de impacto.



Fonte: Autor.

A máquina de ensaio de impacto (Figura 22) pertence à marca chinesa Time Group Inc. O corpo de prova foi apoiado nas duas extremidades e posicionado horizontalmente (Figura 23).

Figura 22 - Equipamento de ensaio de impacto.



Fonte: Autor.

Figura 23 - Posicionamento do corpo de prova.



Fonte: Autor.

O martelo foi posicionado em uma altura  $H_q$  (usando 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  $h_r$  (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. O ensaio de impacto seguiu todas as exigências descritas na norma internacional ASTM E23 - 94a.

#### *4.2.5.1 Análise de fratura*

As superfícies das amostras fraturadas no ensaio de impacto foram observadas em um microscópio digital, com aumento de 1000x da marca CE.

#### 4.2.6 Ensaio de dureza

Para o ensaio de dureza utilizou-se os corpos de prova antes da realização do ensaio de impacto. Tomou-se 1 amostra de cada condição para a realização do ensaio (totalizando 5 amostras). O ensaio de dureza foi realizado nas 30 amostras tratadas e não tratadas.

As medidas de dureza foram realizadas em um durômetro do tipo Rockwell, da marca Pantec (Figura 24), em escala B para as amostras não tratadas, e C para amostras tratadas. Foram realizadas 10 medições em cada uma das amostras obtendo-se no final a média aritmética.

Figura 24 - Durômetro Rockwell.



Fonte: Autor.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos resultados obtidos através dos tratamentos termoquímico e térmico, como: análise química, análise metalográfica, ensaio de impacto e dureza e metalografia, serão mostrados e discutidos a seguir.

### 5.1 ANÁLISE QUÍMICA

Com base nos dados obtidos após a análise química, foi possível identificar a porcentagem dos elementos presentes nas amostras após os tratamentos.

Tabela 6 - Composição química (em %) das amostras.

Condição	C	Mn	Si	Al	S	Cr	P	Ni	Ti	Nb
1	0,14	0,63	0,21	0,020	0,007	0,01	0,011	0,01	0,001	0,001
3	0,90	0,68	0,09	0,00	0,008	0,00	0,019	0,00	0,00	0,056
4	0,70	0,67	0,08	0,00	0,00	0,00	0,017	0,00	0,00	0,52
5	0,68	0,66	0,08	0,00	0,004	0,00	0,021	0,00	0,00	0,58

Fonte: Autor.

Através dos resultados obtidos verifica-se que após os tratamentos, praticamente todos os principais elementos constituintes do aço ASTM A36 não tiveram variações significativas de composição química. Assim, todos os processos de tratamento termoquímico e térmico e não tiveram grandes influências nos elementos secundários.

Contudo, comparando-se a composição química da condição 1 com a condição 3, verifica-se um aumento significativo do teor, que antes era de 0,14% C e passou a ser 0,90% C, logo, pode-se afirmar que o tratamento termoquímico de cementação obteve bons resultados, já que sua finalidade foi de aumentar o teor de carbono em aços de baixo carbono.

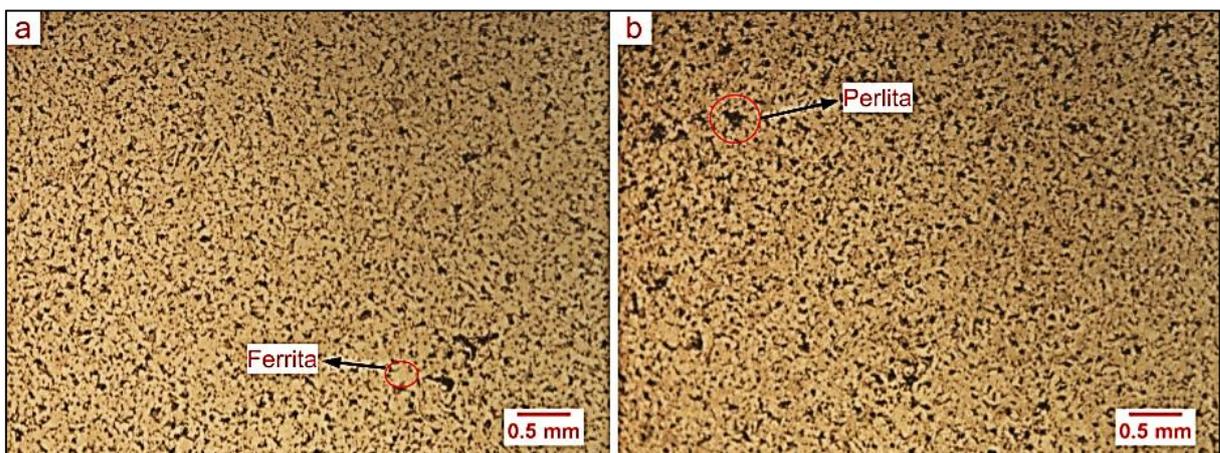
Em virtude das 5 condições de estudo propostas, pode-se observar também alterações no teor de carbono, pois ele pode se rearranjar na microestrutura do aço de maneiras diferentes.

Em virtude da falta de material, não foi realizada análise química da condição 2.

## 5.2 ANÁLISE METALOGRAFICA

A micrografia da Figura 25 apresenta a condição 1, que não sofreu tratamento termoquímico e térmico. A micrografia apresenta grãos de ferrita (coloração mais clara) rodeadas com ilhas de perlita (coloração mais escura) nos contornos de grão. Tanto a ferrita como a perlita apresentam grãos grosseiros, característica normal dos grãos sem tratamentos do aço estudado.

Figura 25 - Condição 1 (sem tratamento): (a) centro e (b) borda da amostra. Ataque Nital 2%.

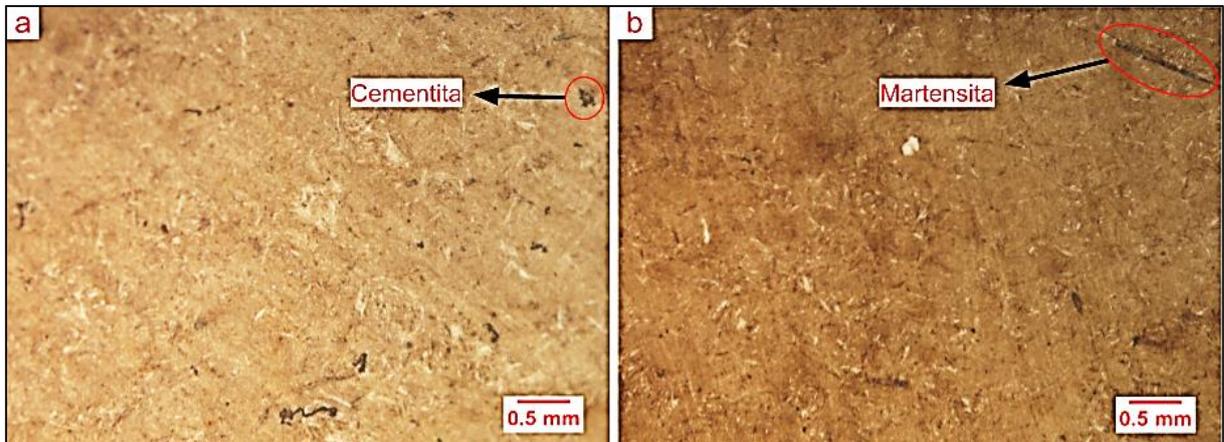


Fonte: Autor.

A Figura 26 mostra a condição 2 do aço ASTM A36, submetido a tratamento termoquímico (cementação a 950°C durante 5 horas), e tratamento térmico (Têmpera a 850°C durante 30 minutos e Revenido a 450°C durante 60 minutos).

A micrografia apresenta claramente a formação da martensita após os tratamentos, ainda que em pouca quantidade. Pode-se notar a precipitação de carbonetos finos, a qual origina uma estrutura com aparência de um agregado escuro (cementita).

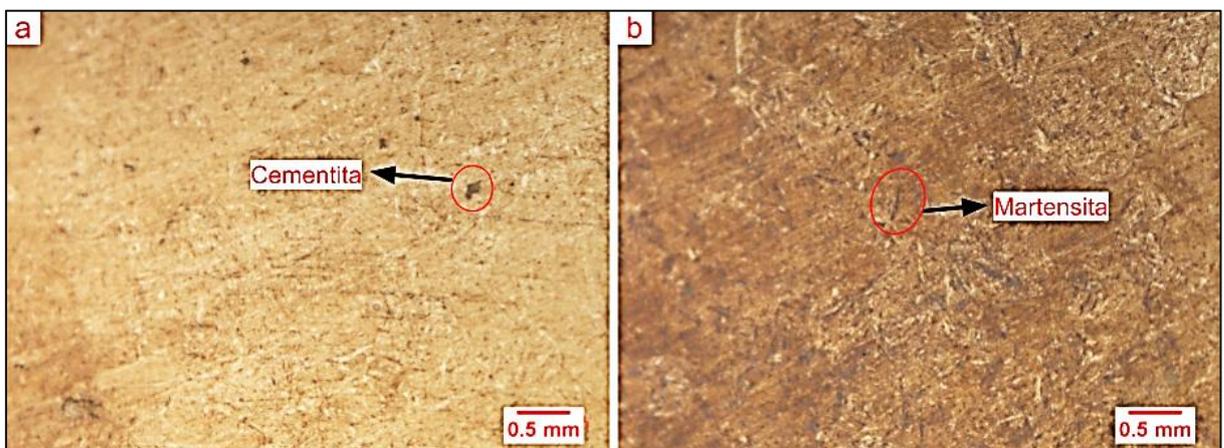
Figura 26 - Condição 2 (30 min Têmpera; 450 °C Revenido): (a) centro e (b) borda da amostra. Ataque Nital 2%.



Fonte: Autor.

Nas temperaturas de 450 °C de revenido ocorrem mais transformações, fazendo com que haja pouca quantidade de martensita. Em temperaturas mais elevadas, nota-se aspecto mais escuro, chamada de martensita revenida. A condição 3 mostra grande diferença do centro (a) para a borda (b), onde nota-se uma coloração mais escura na borda, em consequência da quantidade de carbono ser maior (devido à cementação), assim maior quantidade de martensita formada e consequentemente revenida (martensita em placas). Em comparação com a Figura 26 nota-se maior quantidade de martensita formada em virtude do maior tempo de têmpera (60 minutos).

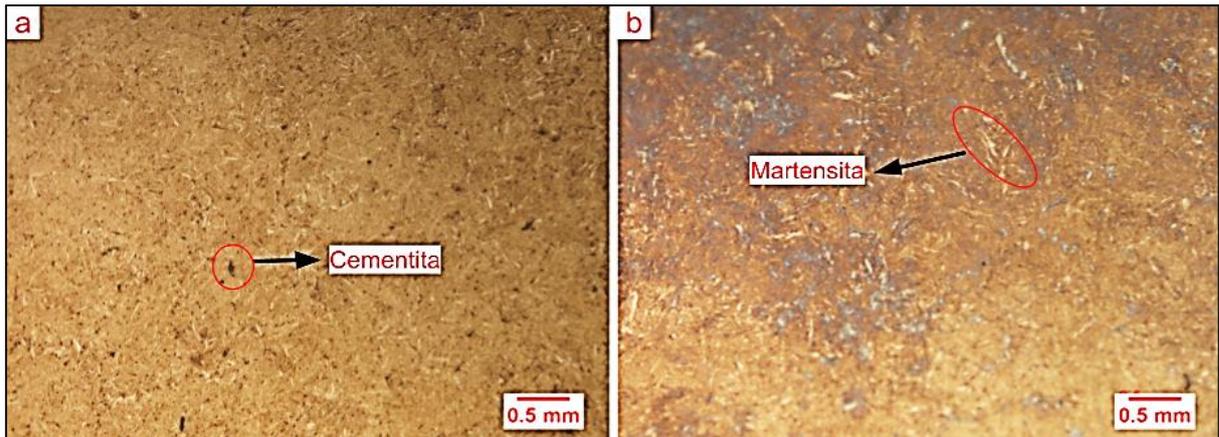
Figura 27 - Condição 3 (60 min Têmpera; 450 °C Revenido): (a) centro e (b) borda da amostra. Ataque Nital 2%.



Fonte: Autor.

Notam-se na Figura 28 grãos de martensita um crescimento não uniforme, ou seja, maioria dos grãos está em tamanhos maiores e alguns em tamanhos menores com extremidades agulhadas. Também é possível notar diferenças do centro para a borda da amostra. Há pouca presença de martensita causada pelo pouco tempo de têmpera.

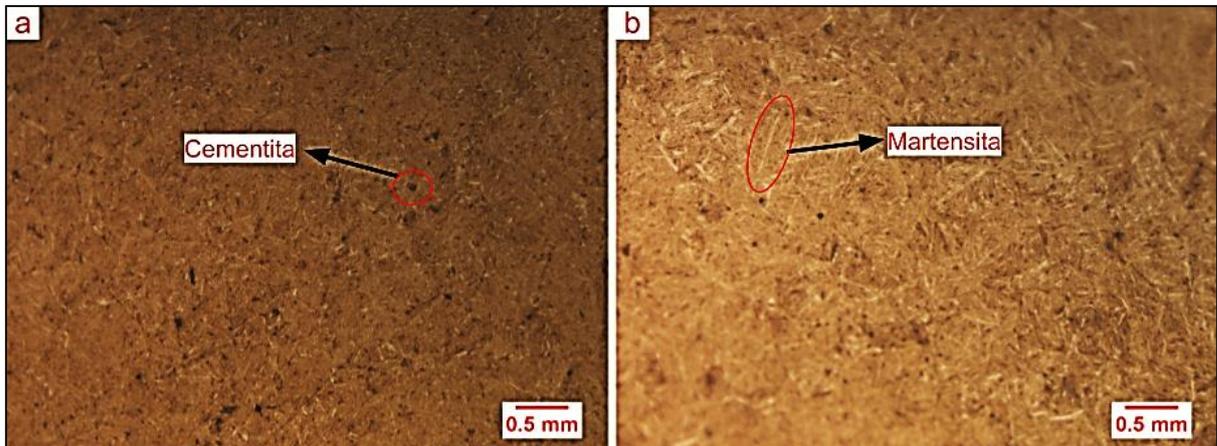
Figura 28 - Condição 4 (30 min Têmpera; 250 °C Revenido): (a) centro e (b) borda da amostra. Ataque Nital 2%.



Fonte: Autor.

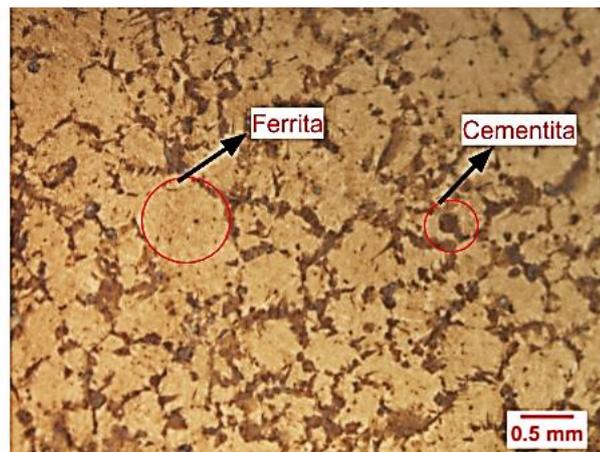
Percebe-se nitidamente a diferença entre as microestruturas observadas na Figura 26, com pouca quantidade de martensita e aquela observada na Figura 29, com grande quantidade de martensita, que é fruto do resfriamento brusco da austenita durante o tratamento térmico de têmpera. Revenimento em torno de 250 °C não propicia muitas transformações sensíveis, as estruturas apresentam aspecto mais claro, idêntico ao da martensita original (martensita branca). Em comparação com o ensaio de impacto e dureza, essa amostra apresentou menor valor de energia absorvida e maior valor de dureza, o que condiz com sua microestrutura, pois possui maior quantidade de martensita.

Figura 29 - Condição 5 (60 min Têmpera; 250 °C Revenido): (a) centro e (b) borda da amostra. Ataque Nital 2%.



Fonte: Autor.

Figura 30 - Micrografia da matriz da amostra da condição 4, que representa a matriz de todas as condições. A matriz é formada por ferrita e cementita. Ataque Nital 2%.



Fonte: Autor.

Mediante análises das micrografias, verificou-se que para cada condição descrita anteriormente formaram-se microestruturas que apresentaram diferenças sutis, caracterizando assim propriedades mecânicas distintas, como será analisado nos ensaios de impacto e dureza nos tópicos seguintes.

### 5.3 ENSAIO DE IMPACTO

Foi realizado o ensaio de impacto nas amostras sem tratamento e com tratamento, sendo 6 corpos de prova para cada condição. Os resultados das energias absorvidas nas 5 condições estão distribuídos na Tabela 7.

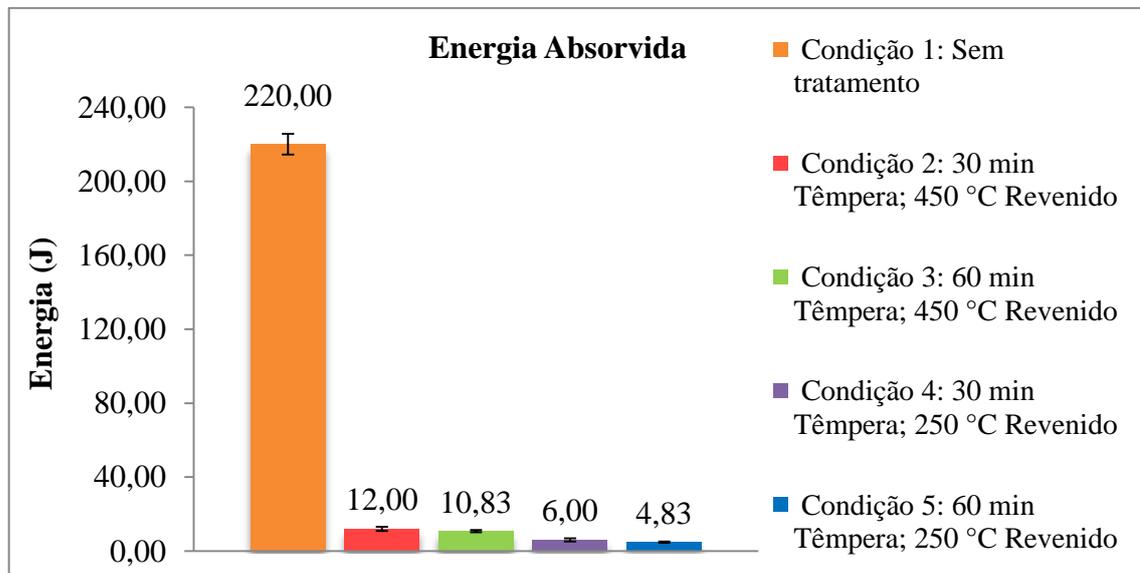
Tabela 7 - Energia absorvida, em joules, pelos corpos de prova após ensaio de impacto.

<b>Condição</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
	200	14	9	6	4
	207	14	12	10	5
<b>Resultados (J)</b>	220	9	9	4	4
	228	15	12	4	4
	232	9	11	6	6
	233	11	12	6	6
<b>Média</b>	220	12,00	10,83	6,00	4,83
<b>Desvio Padrão</b>	13,75	2,68	1,47	2,19	0,98
<b>Erro Padrão</b>	5,62	1,10	0,60	0,89	0,40

Fonte: Autor.

Com os resultados da Tabela 7 foi possível plotar um gráfico comparando todas as energias absorvidas pelos corpos de prova em todas as condições estudadas (Figura 31).

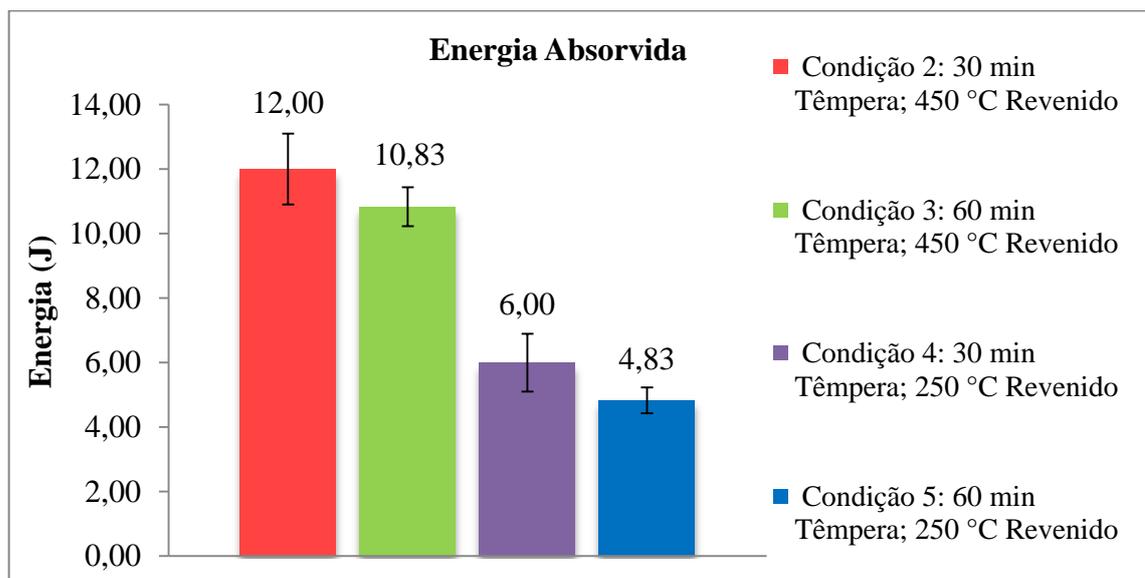
Figura 31 - Resultado das energias absorvidas.



Fonte: Autor.

Observando os resultados obtidos no ensaio de impacto, pode-se observar o decréscimo significativo da energia absorvida pelos corpos de prova, sendo assim a resistência ao impacto dos corpos de prova tratados termicamente decresce em relação à condição 1 (amostra sem tratamento). De posse dos dados do gráfico, é possível inferir que o material da condição 1, consiste em um material de maior tenacidade e maior resistência ao impacto.

Figura 32 - Energias absorvidas pelas amostras tratadas.



Fonte: Autor.

A Figura 32 apresenta o gráfico apenas das amostras tratadas. É possível observar que a energia absorvida é decrescente, isso acontece pela diferença da temperatura de revenido.

As amostras 2 e 3 sofreram um revenimento de 450 °C, fazendo com que sua energia absorvida durante o impacto seja maior, devido à transformações em sua microestrutura e alívio de tensões proveniente da têmpera. Isso mostra que a microestrutura resultante deste é mais dúctil que as demais. Estas condições resultaram na menor fragilidade do aço tratado.

Segundo Krauss (2000) em temperaturas mais altas de revenimento significa maior alívio de tensões, maior tenacidade e menor dureza.

Dependendo da temperatura, pequenas ou grandes transformações na estrutura martensítica resultam, revenimento entre 360 °C a 700 °C ocorrem as maiores transformações estruturais e mecânicas (CHIAVERINI, 2003).

As amostras 4 e 5 sofreram um revenimento de 250 °C, essa temperatura não confere ao material grandes transformações nem alívios de tensões, possuindo então menor tenacidade ao impacto, acarretando em menor absorção de energia,.

Na faixa de revenimento de 200 °C a 260 °C não se verifica nenhuma modificação estrutural notável. Essa faixa de temperatura possibilita ajustar a dureza e diminuir a fragilidade do material, melhorando sua tenacidade (CHIAVERINI, 2003).

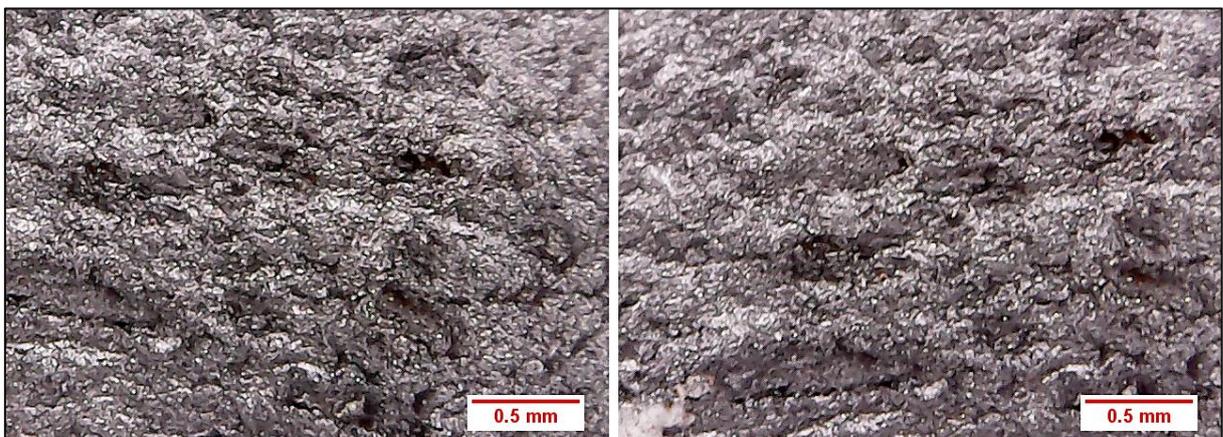
É possível observar também que os tempos maiores de têmpera (60 minutos) conferiram ao material menor absorção de energia em comparação àqueles materiais que tiveram 30 minutos de têmpera. Isso pode ter ocorrido em função de uma maior austenitização do material e, conseqüentemente, maior transformação da austenita em martensita, durante o resfriamento.

### 5.3.1 Análise de fratura

As fraturas produzidas por impacto podem ser frágeis ou dúcteis. As fraturas frágeis caracterizam-se pelo aspecto cristalino e as fraturas dúcteis apresentam aparência fibrosa.

A Figura 33 mostra a superfície de fratura da condição 1 (sem tratamento). Nota-se uma aparência fibrosa e não se percebe nenhuma presença de trinca. A amostra da condição 1 foi a que apresentou maior valor de energia absorvida, em média de 220 J, houve grande deformação plástica, portanto, conclui-se claramente que o mecanismo desta fratura se deu de forma dúctil.

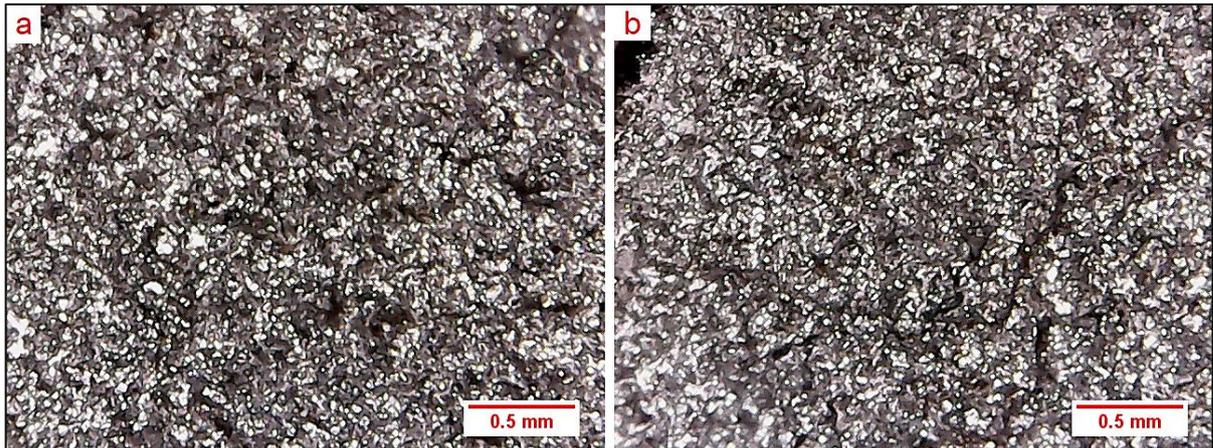
Figura 33 - Superfície de fratura da condição 1.



Fonte: Autor.

A Figura 34 mostra o aspecto de uma fratura do tipo frágil, é possível identificar pequenas trincas, a fratura foi mais regular e não apresentou considerável deformação plástica. Essas condições apresentaram energias de absorção próxima uma da outra (12 J e 10,83 J), porém baixas se comparadas à condição 1.

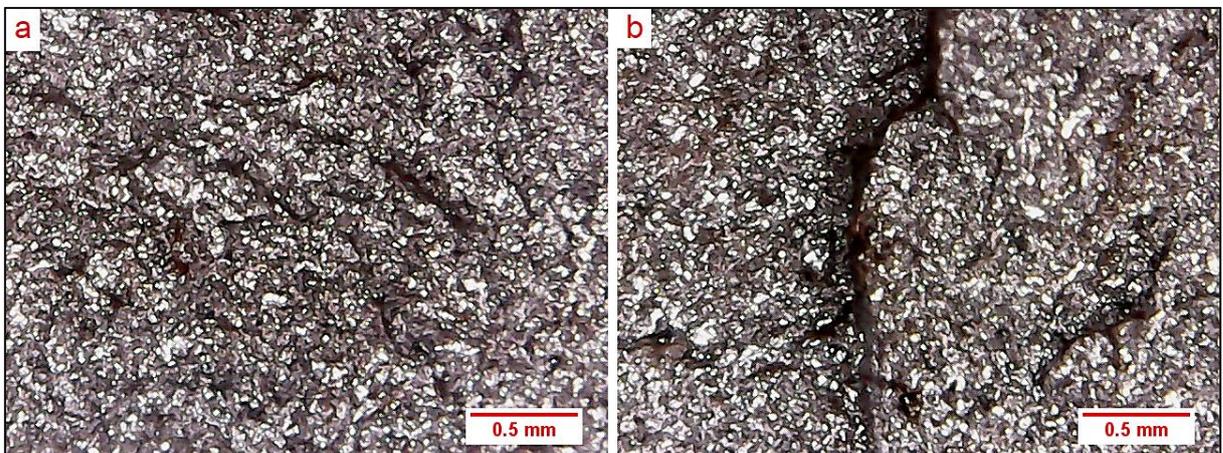
Figura 34 - Superfície de fratura: (a) condição 2; (b) condição 3.



Fonte: Autor.

Novamente na Figura 35 nota-se que as rupturas possuem aparência cristalina típica das fraturas frágeis. A superfície de ruptura se dá de forma brusca, lisa e plana. Em (b) é possível notar ainda uma grande propagação de trinca o que propiciou o rápido rompimento do material conferindo a ele uma baixa absorção de energia, a menor dentre as amostras (4,83 J).

Figura 35 - Superfície de fratura: (a) condição 4; (b) condição 5.



Fonte: Autor.

#### 5.4 ENSAIO DE DUREZA

Os resultados de dureza do aço ASTM A36, contendo a média, desvio padrão e erro padrão após tratamento térmico de têmpera e revenido serão mostrados na Tabela 8. As amostras sem tratamento foram ensaiadas em escala Rockwell B (para aços não temperados), as amostras tratadas foram ensaiadas em escala Rockwell C (para aços temperados e/ou cementados).

O ensaio foi realizado segundo a norma ASTM E18-94 (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

Para fins de comparação, os resultados das durezas foram convertidos para a dureza Brinell (tabela de conversões GARCIA; SPIM; SANTOS), assim foi possível plotar um gráfico que reúne todas as condições estudadas e suas respectivas durezas (Figura 36).

Tabela 8 - Dureza das amostras.

<b>Condição</b>	<b>1 (HRB)</b>	<b>2 (HRC)</b>	<b>3 (HRC)</b>	<b>4 (HRC)</b>	<b>5 (HRC)</b>
	62,3	28,9	31,9	41	44,4
	65,1	32,1	32,9	41,5	44,8
	65,7	33,7	35,7	43,3	45
	67,3	34,8	35,7	44,3	45,2
	67,4	35,1	36,4	44,4	46
<b>Resultados</b>	68,7	35,3	36,6	44,6	46,7
	69,1	36,3	36,8	46,7	47,6
	69,4	36,6	38,6	46,9	47,9
	69,9	38,3	38,7	47	49
	70,1	38,4	39,6	48,8	49,6
<b>Média</b>	67,50	34,95	36,29	44,85	46,62
<b>Desvio Padrão</b>	1,81	2,04	2,02	1,77	2,25
<b>Erro Padrão</b>	0,57	0,65	0,64	0,56	0,71
<b>Dureza Brinell</b>	116	321	341	415	444

Fonte: Autor.

A condição 1 apresentou o menor valor de dureza dentre as condições estudadas, o material apresentou dureza Brinell de 116.

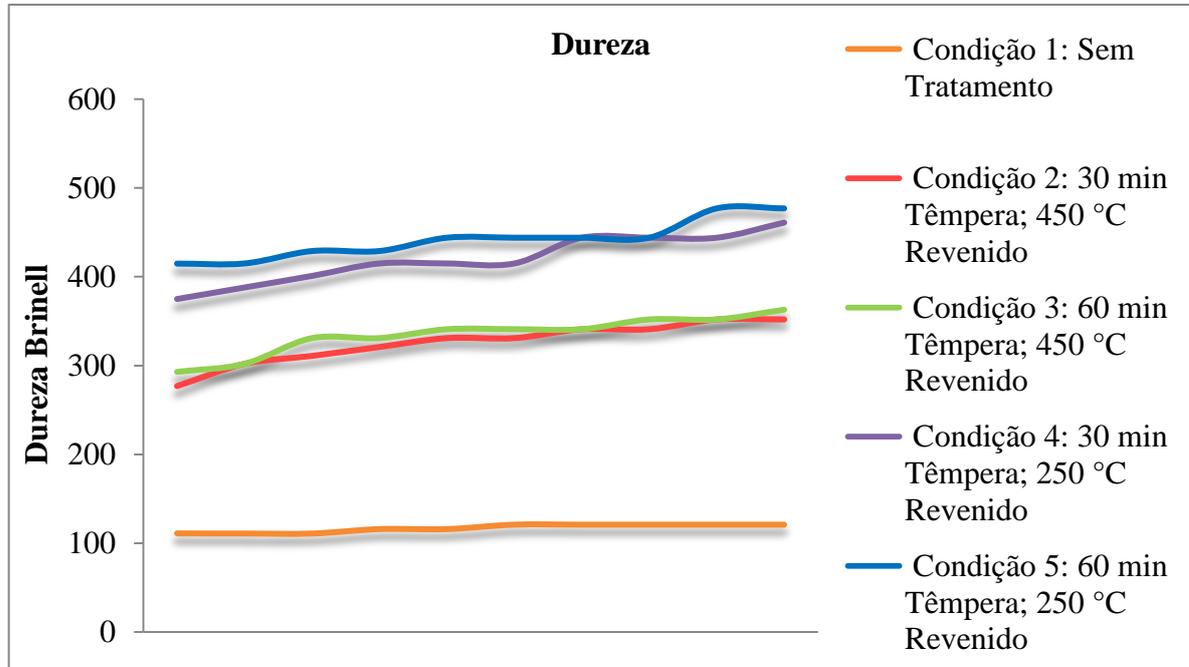
As condições 2 e 3 que sofreram revenido de 450 °C apresentam menores valores de durezas em relação as amostras que tiveram um revenimento de 250 °C.

As condições 4 e 5 apresentaram maiores valores de dureza, isso se deve à temperatura de revenimento de 250 °C, que causa pouca diminuição na dureza. Sendo a

condição 5 a que maior apresentou valor de dureza.

Observando a Figura 36, é possível identificar que ciclos térmicos de tratamentos foram eficazes no que diz respeito ao aumento de dureza do material.

Figura 36 - Gráfico de dureza comparando todas as condições.



Fonte: Autor.

## 5.5 COMPARATIVOS

### 5.5.1 Dureza x resistência ao impacto x temperatura de revenido

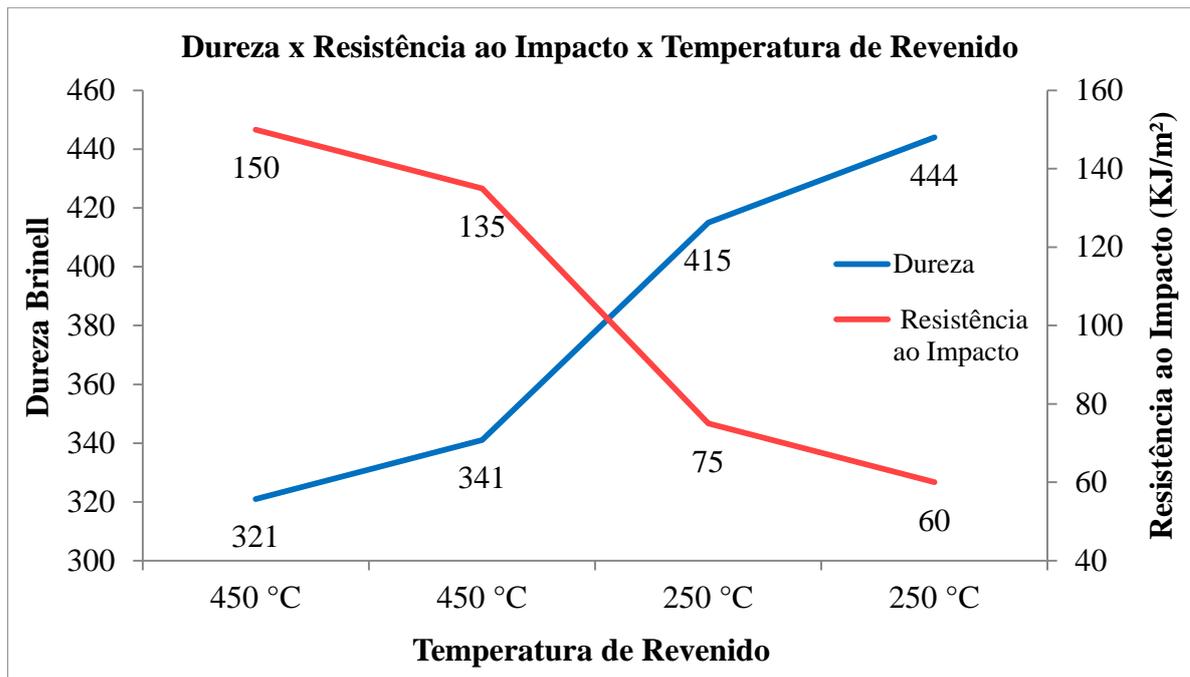
Como visto anteriormente, a temperatura de revenido tem profunda influência na dureza do material. Como mostra o gráfico da Figura 36, temperaturas de revenido mais baixas conferem ao material maior dureza, pois a microestrutura do material não sofre grandes transformações, ou seja, há grande quantidade de martensita, fase que possui altos valores de durezas. Já temperaturas mais elevadas, a microestrutura é menos frágil e mais dúctil que as demais condições, portanto, mais preparada para absorver energia antes de ocorrer a fratura.

Segundo Chiaverini (2003) existem duas faixas de temperatura favoráveis para o revenido dos aços (150 °C a 200 °C), no sentido de melhorar sua tenacidade sem prejudicar sua dureza, pois resulta apenas um ligeiro acréscimo de tenacidade. Segundo Pandolfo (2009) a temperatura de revenido pode ser escolhida de acordo com a combinação de propriedades mecânicas que se deseja no aço temperado.

Para cada uma das médias obtidas do ensaio de impacto foi calculada a resistência ao impacto (RI), utilizando-se a equação (4).

$$RI = \frac{U_0}{A_{\text{resistente}}} \quad (4)$$

Figura 37 - Gráfico de dureza, resistência ao impacto e temperatura de revenido.

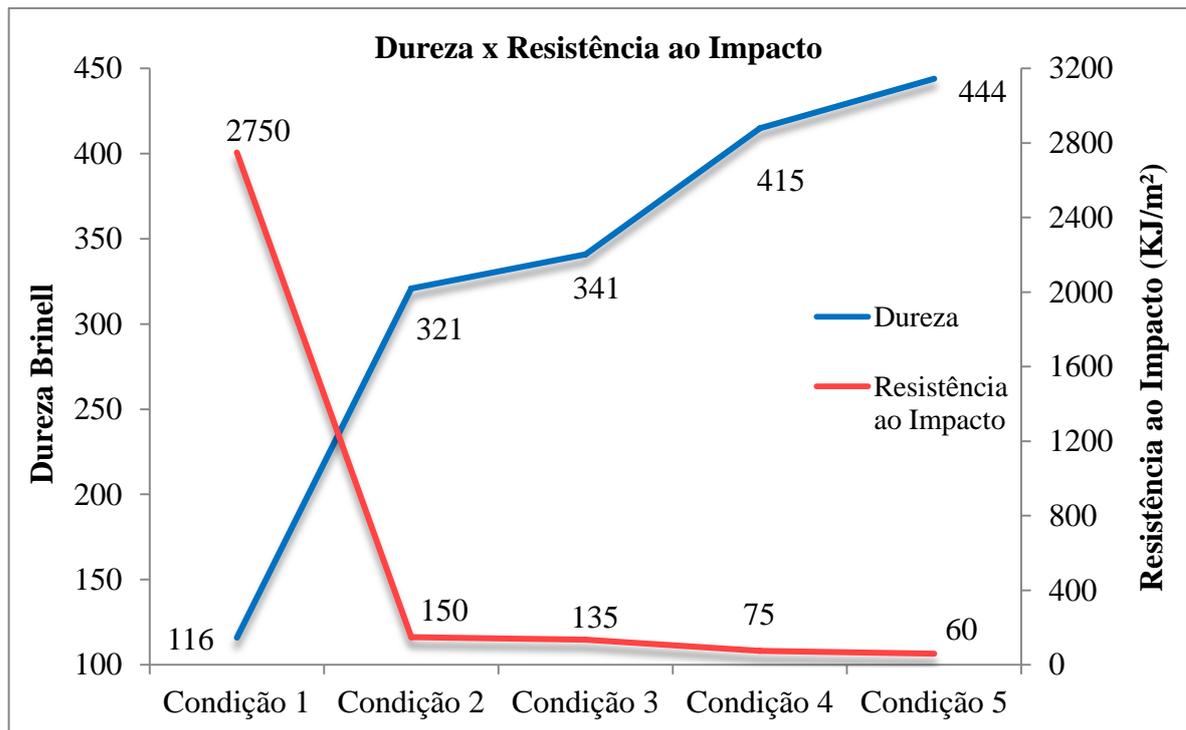


Fonte: Autor.

### 5.5.2 Dureza x resistência ao impacto

O gráfico da Figura 38 nos mostra que quanto maior a resistência ao impacto de um material, menor será sua dureza, ou seja, dureza e tenacidade são inversamente proporcionais. O material que possui maior dureza é mais frágil, rompendo facilmente quando submetido ao impacto, pois absorve valores baixos de energia.

Figura 38 - Comparação da dureza e resistência ao impacto



Fonte: Autor.

## 6 CONCLUSÕES

- O objetivo do tratamento termoquímico consiste em aumentar o teor de carbono do aço cementado, sendo assim, o aço ASMT A36 teve o teor de carbono o aumento do teor em todas as condições, sendo a condição 3 a mais satisfatória nesse quesito, teve um aumento de 0,14% C para 0,90% C.

- Através da microestrutura foi possível observar o aumento de carbono na camada externa das amostras, em virtude do processo de cementação, onde aumenta-se o teor de carbono na superfície do metal por difusão, criando um gradiente de concentração de carbono entre a superfície e o interior do metal.

- A têmpera e revenido também tiveram resultados satisfatórios, analisando-se as microestruturas obtidas, é possível identificar martensita original (martensita branca) e martensita revenida (martensita escura). Essa diferença se originou pelas diferentes temperaturas adotadas de revenido, o que foi intencional, para que se constatassem essas diferenças na microestrutura, bem como em suas propriedades mecânicas. Temperaturas de revenido mais altas conferem aos materiais maiores transformações microestruturais, menor maiores valores de tenacidade e menor valores de dureza. Temperaturas mais baixas conferem aos materiais menor energia para que haja transformações microestruturais, sendo assim, há menores valores de tenacidade e maiores valores de dureza. Os diferentes tempos de têmpera também tiveram grandes influências na microestrutura e propriedades mecânicas das amostras, sendo o tempo de 60 minutos de têmpera o mais satisfatórios (condições 3 e 5), em relação ao tempo de 30 minutos de têmpera.

- Através do ensaio de impacto pôde-se observar o decréscimo da energia absorvida pelos corpos de prova, a resistência ao impacto dos corpos de prova tratados termicamente decresceu em relação à condição 1 (amostra sem tratamento). O ensaio revelou que a condição 5 (cementação a 950 °C durante 5 horas, Têmpera a 850 °C durante 60 minutos e Revenido a 250 °C durante 60 minutos) obteve o menor valor de absorção de energia ao impacto (4,83 J), caracterizando a fragilidade do material.

- No ensaio de dureza a amostra submetida à condição 5 apresentou maior valor de dureza. Em conformidade com a micrografia apresentada na Figura 29 e ensaio de impacto, essa amostra apresentou maior quantidade de martensita e conseqüentemente maior valor de dureza (444 HB). Esse resultado é satisfatório, pois antes do tratamento a amostra apresentava um baixo valor de dureza (116 HB).

- No gráfico de dureza x resistência ao impacto é notadamente perceptível que quanto maior a resistência ao impacto menor será a dureza do material e vice-versa. Isso ocorre porque quanto maior é a dureza do material, maior é a fragilidade, por isso o material rompe facilmente quando submetido ao ensaio de impacto, conseqüentemente menor é a energia absorvida no ensaio.
- De modo geral a microestrutura, dureza e resistência ao impacto do aço ASTM A36 variaram em função dos tratamentos térmicos aplicados.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, C. C.; TANIGUTE, J. **Mecânica: Projetos e Ensaio Mecânicos**. Fundação Padre Anchieta. São Paulo, 2011.
- ASKELAND, D. R.; PHULÉ, P. P. **The Science and Engineering of Materials**. 4 ed. California, USA: Brooks/Cole-Thomson Learning, 2003.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A370/10: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products**. Pensilvânia: ASTM, 2010.
- BAUMGARTEN, J. F.; COSTA, C. E. **Cementação Empregando Granulados Elaborados a Partir de Carvão Vegetal Reciclado e Ativador de Carbonato de Cálcio (CaCO<sub>3</sub>)**. Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2003.
- BELGO. **Composição Química do aço ASTM A36**. Disponível em <https://www.belgo.com.br/pro/nbr7007.pdf>. Acesso em 07 de dezembro de 2018.
- BRUNATTO, S. F. **Introdução ao Estudo dos Aços**. Material de leitura da disciplina de Materiais para Construção. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2016.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- CAMPOS, J. A. **Scenario for the Brazilian Steelmaking Industry**. II International Meeting on Ironmaking. Vitória, 2004.
- CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. São Paulo: ABM, 1996.
- CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. São Paulo: ABM, 2012.
- CHIAVERINI, V. **Tratamento Térmico das Ligas Metálicas**. São Paulo: ABM, 2003.
- COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4 ed. São Paulo: Blucher, 2008.
- DAVIS, J. R. **Materials, Properties, and Manufacture**. Ohio, USA: ASM International, 2005.

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

DIAS, V. W. **Estudo Comparativo entre Processos de Revenimento**. Trabalho de graduação em Engenharia Metalúrgica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul, 2010.

ELCONIAN, S. **Mecânica Técnica e Resistência dos Materiais**. São Paulo: Érica, 1988.

FREIRE, J. M. **Materiais de Construção Mecânica**. Rio de Janeiro: LTC, 1989.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos Materiais**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

GERDAU. **Certificado de Qualidade**. Gerdau S.A, 2018.

GONÇALVES, R. B. P. **Estudo Avaliativo da Resistência ao Impacto de um Aço SAE 4140 após Tratamento Termoquímico de Cementação**. Trabalho de graduação em Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará. Marabá, 2014.

GURU. **Ensaio de Dureza**. Disponível em <https://www.cursosguru.com.br/como-acontece-o-ensaio-de-dureza-rockwell/>. Acesso em 09 de dezembro de 2018.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**, 5 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

HOUGHTON. **Fundamentals of Quenching**. Disponível em <http://www.houghton.co.uk/divisions/htreat/fundamentals.asp>. Acesso em 07 de dezembro de 2018.

IFPA. **Ensaio de Dureza**. Material de leitura da disciplina de Ensaio Mecânicos de Materiais. Instituto Federal de São Paulo. São Paulo, 2005.

KNOLL, P. K. **Utilização de Solução Polimérica em Substituição ao Óleo como Meio de Resfriamento no Tratamento Térmico de Têmpera de Barras de Aço**. Dissertação de mestrado em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2009.

KRAUSS, G. **Steels: Heat Treatment and Processing Principles**. 6 ed. Ohio, USA: ASM International, 2000.

PANDOLFO, D. **Estudo da Tenacidade ao Impacto de um aço SAE 1020 Submetido a Tratamento Térmico**. Trabalho de graduação em Engenharia Mecânica. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2009.

PATROCÍNIO, B. A. **Determinação de Velocidades Críticas de Têmpera em Aços por Meio de Curvas de Resfriamento**. Dissertação de mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade de São Paulo. São Carlos, 1999.

PUKASIEWICZ, A. G. M. **Aços: Tratamentos Térmicos**. Material de leitura da disciplina Materiais II. Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná. Ponta Grossa, 2003.

SENAI. **Tratamento Térmico**. Material de leitura do Módulo especial – Mecânica. Instituto Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003.

SILVA, A. L. C.; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais**. São Paulo: Blucher, 2010.

SOUZA, S. A. **Ensaaios Mecânicos de Materiais Metálicos: Fundamentos Teóricos e Práticos**. 5 ed. São Paulo: Editora Blucher, 1982.

SHACKELFORD, J. **Introduction to Materials Science for Engineers**. 5 ed. New Jersey, USA: Prentice Hall, 1999.

VAN VLACK, L. H. **Princípios de Ciência dos Materiais**. São Paulo: Blucher, 1970.