



**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
PRO-REITORIA DE GRADUAÇÃO  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**ADISSON AGANETT GOMES  
ANDERSON AGANETT GOMES  
VICTOR MACENA DE AQUINO SOUZA**

**AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA (ARBL) X AÇOS  
CARBONO-MANGANÊS: ASPECTOS METALÚRGICOS E  
MECÂNICOS DEFININDO A SELEÇÃO PARA APLICAÇÃO EM  
PROJETOS DE ENGENHARIA**

**VOLTA REDONDA  
2020**

**ADISSON AGANETT GOMES  
ANDERSON AGANETT GOMES  
VICTOR MACENA DE AQUINO SOUZA**

**AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA (ARBL) X AÇOS  
CARBONO-MANGANÊS: ASPECTOS METALÚRGICOS E  
MECÂNICOS DEFININDO A SELEÇÃO PARA APLICAÇÃO EM  
PROJETOS DE ENGENHARIA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado a ENGENHARIA MECÂNICA do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, como requisito obrigatório para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

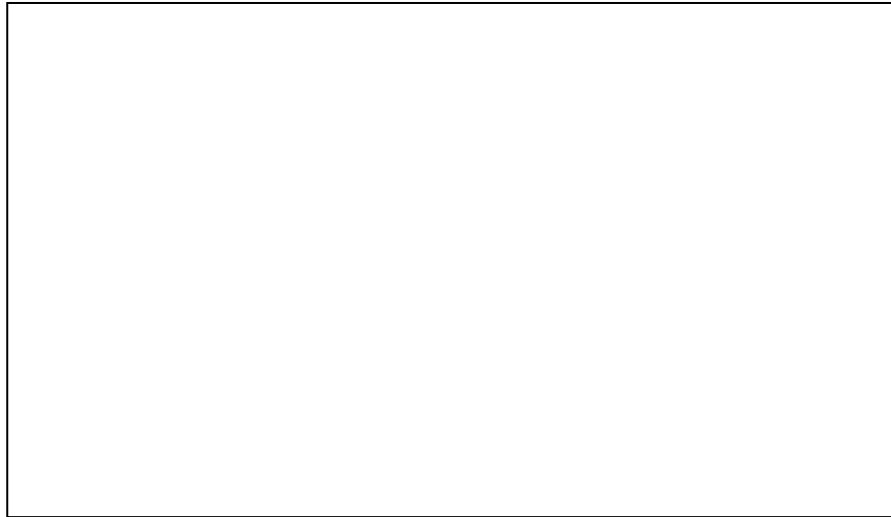
Orientador: Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

**VOLTA REDONDA  
2020**

**FICHA CATALOGRÁFICA**

Bibliotecária: Alice Tacão Wagner - CRB 7/RJ 4316





**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
PRO-REITORIA DE GRADUAÇÃO  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**ADISSON AGANETT GOMES  
ANDERSON AGANETT GOMES  
VICTOR MACENA DE AQUINO SOUZA**

Aço de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL) x Aços Carbono-Manganês: Aspectos Metalúrgicos e Mecânicos Definindo a Seleção para Aplicação em Projetos de Engenharia

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
“ENGENHEIRO MECÂNICO”**

**APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE ENGENHARIA  
MECÂNICA**

---

**Prof. MSc. Diniz Felix dos Santos  
Coordenador**

**BANCA EXAMINADORA:**

---

**Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira**  
1º Membro da banca/Orientador/UniFOA

---

**Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe**  
2º Membro da banca/UniFOA

---

**Prof. Dr. Rui Aurélio Barbosa**  
3º Membro da banca/UniFOA

Junho de 2020.

## DEDICATÓRIA

Ao nosso professor e mestre Carlos Roberto Xavier, por todo auxílio e atenção prestado a nós e aos nossos pais e a todos nossos familiares que não mediram esforços para que nós chegássemos até esta etapa de nossas vidas.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos primeiramente a Deus, que nos guiou, protegeu e fortaleceu, não somente durante estes anos como universitários, mas a cada dia ao longo de nossas vidas.

A instituição UniFOA, através de seu corpo docente, direção e administração, que oportunizou a abertura da janela da qual hoje avistamos um horizonte superior.

A todos os professores, por nos proporcionar o conhecimento, por tanto que se dedicaram a nós, não somente por terem nos ensinado, mas por terem nos feito aprender. E agradecer em especial, aos técnicos do laboratório, Dirceu Hartung de Camargo Coutinho e Luciano Monteiro Rodrigues.

Aos nossos pais, que permitiram que tudo isso acontecesse, pelo amor, incentivo e apoio incondicional que sempre nos deram.

E, por fim, e não menos importante, aos nossos amigos e a todos os que direta ou indiretamente fizeram parte da nossa formação, o nosso muito obrigado.

GOMES, Adisson Aganett; Gomes, Anderson Aganett e SOUZA, Victor Macena de Aquino. **AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA (ARBL) X AÇOS CARBONO-MANGANÊS: ASPECTOS METALÚRGICOS E MECÂNICOS DEFININDO A SELEÇÃO PARA APLICAÇÃO EM PROJETOS DE ENGENHARIA.** 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (ENGENHARIA MECÂNICA) – Fundação Oswaldo Aranha, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, RJ, 2020.

## RESUMO

Devido à sua importância, o estudo dos materiais é de grande relevância e imprescindível para um melhor conhecimento e sua aplicação em projetos de engenharia. Neste projeto, além de caracterização mecânica e microestrutural do aço ASTM A572 considerado de alta resistência e baixa liga (ARBL) e do aço carbono manganês ASTM A36 como recebidos, foram avaliados os efeitos das mudanças microestruturais causadas por tratamentos térmicos sobre propriedades como a dureza do (ARBL) e do aço carbono-manganês. A finalidade da pesquisa é analisar a resposta de dois diferentes tipos de aço, porém similares, quando submetidos às mesmas condições, através dos ensaios mecânicos de Charpy, Tração, Dureza Rockwell, Metalografia e tratamentos térmico de têmpera, normalização e recozimento, buscando investigar que a adição de alguns elementos de liga no processo foram fundamentais para influência da microestrutura e conseqüentemente nas propriedades mecânicas do aço. Os resultados foram comparados com o objetivo de apresentar subsídios para tomada de decisões em projetos de engenharia visando requisitos tecnológicos, de segurança e otimização de custos, e a análise é a de que a adição do elemento de liga nióbio participa de forma muito clara e evidencia algumas melhorias significativas no aço, a começar pelo aumento da resistência a tração. Quando comparado o aço ARBL com o aço carbono manganês, fica também evidente a maior tensão de escoamento/ruptura presente e um notável aumento da sua dureza. Por sua vez, a energia absorvida pelo aço ARBL é consideravelmente inferior, neste caso, explicado pela maior dureza e conseqüente menor ductilidade. A baixa temperabilidade do aço ASTM A572 é um grande indicador de uma boa soldabilidade, propriedade importantíssima em projetos de estruturas.

**Palavras-chave:** Aços ARBL e carbono-mangânes. Microestrutura. Tratamentos Térmicos. Ensaio de charpy. Ensaio de Dureza. Ensaio de tração.

GOMES, Adisson Aganett; Gomes, Anderson Aganett and SOUZA, Victor Macena de Aquino. **HIGH RESISTANCE AND LOW ALLOY STEEL (ARBL) X CARBON-MANGANESE STEELS: METALLURGICAL AND MECHANICAL ASPECTS DEFINING THE SELECTION FOR APPLICATION IN ENGINEERING PROJECTS. 2020.** Course Conclusion Paper (MECHANICAL ENGINEERING) - Oswaldo Aranha Foundation, Volta Redonda University Center, Volta Redonda, RJ, 2020.

## ABSTRACT

Due to its importance, the study of materials is of great relevance and essential for a better knowledge and its application in engineering projects. In this project, in addition to mechanical and microstructural characterization of ASTM A572 steel considered high strength and low alloy (ARBL) and carbon manganese steel ASTM A36 as received, the effects of microstructural changes caused by thermal treatments on properties such as hardness (ARBL) and carbon-manganese steel. The purpose of the research is to analyze the response of two different types of steel, however similar, when subjected to the same conditions, through the mechanical tests of Charpy, Tensile, Rockwell Hardness, Metallography and heat treatment of quenching, normalization and annealing, seeking to investigate that the addition of some alloy elements in the process were fundamental for the influence of the microstructure and consequently on the mechanical properties of the steel. The results were compared with the objective of presenting subsidies for decision making in engineering projects aiming at technological, safety and cost optimization requirements, and the analysis is that the addition of the element of niobium alloy participates very clearly and evidences some significant improvements in steel, starting with increased tensile strength. When comparing ARBL steel with manganese carbon steel, it is also evident that there is a greater yield / break stress present and a notable increase in its hardness. In turn, the energy absorbed by ARBL steel is considerably lower, in this case, explained by the greater hardness and consequent less ductility. The low hardenability of ASTM A572 steel is a great indicator of good weldability, a very important property in structural design.

**Keywords:** ARBL steels and carbon-manganese. Microstructure. Thermal treatments. Charpy test. Hardness test. Tensile test.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Diagrama ferro-carbono. ....	26
<b>Figura 2</b> - Representação esquemática de um tratamento térmico de têmpera. ....	42
<b>Figura 3</b> - Superposição de curvas de resfriamento no diagrama de Transformação por Resfriamento Contínuo. ....	43
<b>Figura 4</b> - Relação dureza x Teor de carbono fases.....	47
<b>Figura 5</b> - Curva tensão deformação .....	49
<b>Figura 6</b> - Corpo de prova Charpy. ....	53
<b>Figura 7</b> - Corpos de prova tração.....	54
<b>Figura 8</b> - Corpo de prova para análise de espectrometria óptica do aço carbono ASTM A36. ....	54
<b>Figura 9</b> - Corpo de prova para análise de espectrometria óptica do aço carbono ASTM A572 Gr 50. ....	55
<b>Figura 10</b> - Embutidora metalográfica EM30D.....	56
<b>Figura 11</b> - Lixadeira manual Arapol - 2V - Arotec.....	57
<b>Figura 12</b> - Lixa d'água. ....	58
<b>Figura 13</b> - Polimento com pasta de alumina - lixadeira manual Arapol 2V Arotec. .	59
<b>Figura 14</b> - Câmara para ataque químico. ....	60
<b>Figura 15</b> - Microscópio óptico Olympus U-SPT.....	61
<b>Figura 16</b> - Durômetro do tipo Rockwell Pantec. ....	62
<b>Figura 17</b> - Equipamento de ensaio de tração EMIC.....	63
<b>Figura 18</b> - Corpos de prova do aço ASTM A36 após ensaio de tração.....	63
<b>Figura 19</b> - Corpos de prova do aço ASTM A36 e aço ASTM A572 antes do ensaio de tração. ....	64
<b>Figura 20</b> - Corpos de prova do material ASTM A572 após o ensaio de tração.....	64

<b>Figura 21</b> - Corpos de prova do material ASTM A36 após ensaio de charpy. ....	65
<b>Figura 22</b> - Corpos de prova do material ASTM A572 após ensaio de charpy. ....	65
<b>Figura 23</b> - Equipamento de ensaio de charpy Pantec PS 30. ....	66
<b>Figura 24</b> - Corpo de prova posicionado no equipamento de ensaio de charpy Pantec PS30 .....	66
<b>Figura 25</b> - Preparação das amostras em recipiente para realização dos tratamentos térmico. ....	67
<b>Figura 26</b> - Amostras posicionadas no forno. ....	68
<b>Figura 27</b> - Aço carbono ASTM A36 após retirada do forno refratário e posicionado para resfriamento .....	69
<b>Figura 28</b> - Amostra sendo submetida ao resfriamento em água (KTALO TN). ....	69
<b>Figura 29</b> - Amostra sendo submetida ao resfriamento em água. ....	70
<b>Figura 30</b> - Metalografia do aço carbono manganês e ARBL respectivamente com ampliação de 100X.....	72
<b>Figura 31</b> - Metalografia do aço carbono manganês e ARBL respectivamente com ampliação de 200X.....	72
<b>Figura 32</b> - Metalografia do aço carbono manganês e ARBL respectivamente com ampliação de 400X.....	72
<b>Figura 33</b> - Metalografia do aço carbono manganês e ARBL respectivamente com ampliação de 1000X.....	73
<b>Figura 34</b> - Gráfico tensão x deformação do aço ARBL. ....	74
<b>Figura 35</b> - Gráfico tensão x deformação do aço carbono manganês .....	75
<b>Figura 36</b> - Corpo de prova antes do ensaio de tração. ....	77
<b>Figura 37</b> - Corpo de prova após do ensaio de tração. ....	77
<b>Figura 38</b> - Metalografia após o tratamento térmico de recozimento do aço carbono manganês e aço ARBL. Com resolução de 200x.....	83
<b>Figura 39</b> - Metalografia após o tratamento térmico de recozimento do aço carbono	

manganês e aço ARBL. Com resolução de 400x.....	84
<b>Figura 40</b> - Metalografia após o tratamento térmico de normalização do aço carbono manganês e aço ARBL. Com resolução de 200x.....	85
<b>Figura 41</b> - Metalografia após o tratamento térmico de normalização do aço carbono manganês e aço ARBL. Com resolução de 400x.....	85
<b>Figura 42</b> - Metalografia após o tratamento térmico de têmpera em óleo do aço carbono manganês e aço ARBL. Com resolução de 200x.....	86
<b>Figura 43</b> - Metalografia após o tratamento térmico de têmpera em óleo do aço carbono manganês e aço ARBL. Com resolução de 400x.....	86

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Classificação dos aços-carbono quanto à composição .....	27
<b>Tabela 2</b> - Especificações dos perfis do aço ARBL e aço carbono manganês .....	37
<b>Tabela 3</b> - Tabelas de conversão de dureza vickers para dureza Rockwell B .....	48
<b>Tabela 4</b> - Composição química (em %) do aço ASTM A36 e A572.....	52
<b>Tabela 5</b> - Composição química segundo laudo do ensaio de espectrometria do aço ARBL e aço carbono manganês ASTM A36. ....	71
<b>Tabela 6</b> - Resultados do ensaio de tração do aço ARBL. ....	74
<b>Tabela 7</b> - Resultados do ensaio de tração do aço carbono manganês .....	75
<b>Tabela 8</b> - Valores do ensaio de tração do aço ARBL e aço carbono manganês. ....	78
<b>Tabela 9</b> - Comparativo dos valores de ductilidade através do ensaio de charpy dos aços ASTM A36 e A572. ....	79
<b>Tabela 10</b> - Valores de dureza HRB do aço ARBL e aço carbono manganês A36...81	
<b>Tabela 11</b> - Comparativo dos valores coletados através do ensaio de dureza para os aços A36 e A572 tratados termicamente. ....	82

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b> - Relação penetrador, cargas para ensaio e materiais. ....	46
<b>Quadro 2</b> - Comparativo de soldabilidade x teor de carbono do aço. ....	51
<b>Quadro 3</b> - Cronograma físico das atividades. ....	53

## LISTA DE EQUAÇÕES

<b>Equação 1</b> .....	46
<b>Equação 2</b> .....	75
<b>Equação 3</b> .....	76
<b>Equação 4</b> .....	76

## LISTA DE ABREVIATURA, SIGLAS E SIMBOLOS

AISI	Instituto Americano de Ferro e Aço
ARBL	Alta Resistência e Baixa Liga
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CBCA	Centro Brasileiro da Construção em Aço
CCC	Cúbica de Corpo Centrado
CFC	Cúbica de Face Centrada
CP	Corpo de Prova
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
Fe <sub>3</sub> C	Carboneto de Ferro
Fe-C	Ferro Carbono
FEM	Fábrica de Estruturas Metálicas
HRB	<i>Hard Rockwell B</i>
IUPAC	União Internacional de Química Pura e Aplicada
J	Joule
Kg	Quilograma
m	Metro
m/s	Metro por segundo
m/s <sup>2</sup>	Metro por segundo ao quadrado
Mn	Manganês
MnS	Manganês enxofre
MPa	Mega Pascal
Nb	Nióbio
NBR	Norma Brasileira
SAE	Instituto de Engenheiros Automotivos
TMCP	<i>Thermo-Mechanical Controlled Processed</i>
TRC	Transformação por Resfriamento Contínuo
TTT	Tempo – Temperatura – Transformação
ZTA	Zona Termicamente Afetada

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
<b>2 OBJETIVO</b> .....	<b>20</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>21</b>
3.1 HISTÓRICO DA METALURGIA .....	21
3.2 BREVE HISTÓRICO DO AÇO NO BRASIL .....	23
3.3 DEFINIÇÃO DOS AÇOS .....	23
3.4 DIAGRAMA FERRO-CARBONO .....	24
3.5 DESIGNAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS .....	27
3.6 FASES PRESENTES NO DIAGRAMA FERRO-CARBONO .....	27
3.7 AÇO ASTM A36 .....	29
3.8 AÇO ASTM A572 .....	29
3.9 APLICAÇÃO DOS AÇOS .....	30
<b>3.9.1 Aços carbono</b> .....	<b>30</b>
<b>3.9.2 Aços estruturais</b> .....	<b>32</b>
3.10 INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS DE LIGA NOS AÇOS .....	32
3.11 MANGANÊS (Mn) .....	33
3.12 NIÓBIO (Nb) .....	34
3.13 INFLUÊNCIA DO NIÓBIO NO AÇO ARBL .....	34
3.14 PARÂMETROS ESTRUTURAIS .....	36
3.15 TRATAMENTOS TÉRMICOS DOS AÇOS .....	37
<b>3.15.1 Recozimento</b> .....	<b>38</b>
<b>3.15.2 Normalização</b> .....	<b>39</b>
<b>3.15.3 Têmpera</b> .....	<b>39</b>

3.15.3.1 Temperabilidade.....	40
3.15.3.2 Martensita.....	41
3.15.3.3 Meios de resfriamento para têmpera.....	43
3.16 REVENIMENTO .....	44
3.17 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS .....	44
<b>3.17.1 Ensaio de impacto.....</b>	<b>45</b>
<b>3.17.2 Dureza .....</b>	<b>45</b>
3.17.2.1 Dureza Rockwell .....	45
3.17.2.2 Dureza Vickers .....	46
<b>3.17.3 Tração.....</b>	<b>49</b>
3.18 SOLDABILIDADE .....	50
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>52</b>
4.1 MATERIAIS .....	52
4.2 MÉTODOS .....	52
<b>4.2.1 Cronograma físico das atividades .....</b>	<b>52</b>
<b>4.2.2 Confecção dos corpos de provas .....</b>	<b>53</b>
<b>4.2.3 Espectrometria .....</b>	<b>54</b>
<b>4.2.4 Metalografia .....</b>	<b>55</b>
4.2.4.1 Embutimento .....	56
4.2.4.2 Lixamento.....	57
4.2.4.3 Polimento .....	58
4.2.4.4 Ataque químico .....	59
4.2.4.5 Análise óptica das amostras.....	60
<b>4.2.5 Ensaio de dureza.....</b>	<b>61</b>

<b>4.2.6 Ensaio de tração</b> .....	<b>62</b>
<b>4.2.7 Ensaio de charpy</b> .....	<b>64</b>
<b>4.2.8 Tratamento térmico</b> .....	<b>67</b>
4.2.8.1 Tratamento de recozimento.....	68
4.2.8.2 Tratamento de normalização.....	68
4.2.8.3 Tratamento de têmpera em óleo .....	69
4.2.8.4 Tratamento de têmpera em água .....	70
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>71</b>
5.1 ANÁLISE ESPECTROMÉTRICA DO MATERIAL COMO RECEBIDO.....	71
5.2 ANÁLISE METALOGRÁFICA DOS MATERIAIS RECEBIDOS.....	71
5.3 ENSAIO DE TRAÇÃO .....	73
5.4 Ensaio de charpy.....	78
5.5 ENSAIO DE DUREZA DO MATERIAL COMO RECEBIDO .....	80
5.6 ANÁLISE COMPARATIVA DOS AÇOS APÓS TRATAMENTO TÉRMICO .....	81
<b>5.6.1 Ensaio de dureza após tratamento térmico</b> .....	<b>81</b>
5.7 ANÁLISE COMPARATIVA DAS MICROESTRUTURAS APÓS TRATAMENTO TÉRMICO.....	83
<b>5.7.1 Recozimento</b> .....	<b>83</b>
<b>5.7.2 Normalização</b> .....	<b>84</b>
<b>5.7.3 Têmpera em óleo</b> .....	<b>86</b>
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	<b>88</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>90</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>94</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O aço estrutural é conhecido mundialmente como uma solução para desafios importantes enfrentados na construção de edifícios e aplicação em projetos de engenharia nos mais variados campos de aplicação. Há uma forte demanda para construir mais rapidamente, reduzindo a energia e a matéria-prima consumida.

Os aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL) são potenciais candidatos a ocuparem cada vez mais o espaço dos aços carbono-manganês, tradicionalmente utilizados em projetos industriais e estruturais, entretanto, transformações metalúrgicas consideradas indesejáveis são também mais suscetíveis de ocorrer nos aços ARBL, exatamente devido à sua composição química diferenciada, a qual se justifica pela intenção de se obter propriedades mecânicas comparativamente superiores para esta classe de aços e, conseqüentemente, redução de custos de projetos de engenharia por garantir uma mais benéfica relação resistência/peso.

Devido a esta realidade, os aços estruturais de alta resistência e baixa liga estão sendo cada vez mais aplicados na construção moderna. Aços microligados de alta resistência são aços cujas propriedades foram modificadas pela adição de uma pequena quantidade de um elemento de liga (geralmente inferior a 0,10%). O nióbio é a solução quando a força aumentada e a dureza melhorada são exigidas. O benefício econômico associado com o uso de tais adições pequenas que conferem significantes melhorias para as propriedades mecânicas levaram à crescente popularidade dos aços microligados no mercado, de modo a apresentar uma visão amplificada da real necessidade da aplicação do determinado aço para o evento.

O estudo dos aços ou materiais similares, com adição de alguns elementos de liga, que possam alterar significativamente seus resultados a diferentes tipos de solicitações, afeta diretamente as condições técnico-econômicas para viabilizar o emprego de aços planos de elevada resistência mecânica em aplicações práticas. Componentes veiculares produzidos com materiais de alta resistência e baixa liga – ARBL levam um menor peso, que por consequência, no caso dos automóveis, menor consumo de combustível e um maior desempenho, por possibilitar a redução na espessura dos componentes.

Em aplicações estruturais, resultaria em estruturas com uma resistência

mecânica desejável, com um menor peso, aumentando a capacidade das estruturas e um menor consumo do recurso natural.

A similaridade dos aços estudados, ASTM A36 e ASTM A572, se devem ao fato de as quantidades dos elementos de liga serem quase a mesma, variando de um para o outro, a adição do nióbio e vanádio no segundo aço, resultando em valores mais satisfatórios dependendo da sua aplicação.

Os resultados dos estudos e pesquisas relacionados ao desenvolvimento e aprimoramento de materiais para aplicação em projetos de engenharia são de grande interesse para os engenheiros e projetistas de estruturas e equipamentos industriais. Desta forma, os aços apresentam uma série de vantagens técnicas, econômicas e ambientais em relação a outros tipos de materiais possuindo, por estes motivos, uma extensa gama de aplicações nos mais diversos tipos de cenários, o que justifica investimentos duradouros em pesquisa e desenvolvimento dos mesmos. Entre os setores, onde a demanda por este tipo de material é mais necessária, se situam os mais dinâmicos da atividade industrial, responsáveis por grande parcela do crescimento econômico, geração de empregos e do desenvolvimento tecnológico do país, como a geração de energia, construção civil, exploração e produção de petróleo e gás, indústrias químicas, petroquímicas e alimentícias.

## **2 OBJETIVO**

Neste trabalho o objetivo é comparar o aço ARBL A572 com o aço carbono manganês ASTM A36, visando a melhor seleção para aplicação em projetos de engenharia, mediante realização de tratamentos térmicos, avaliação microestrutural e ensaios mecânicos.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 HISTÓRICO DA METALURGIA

Os primeiros objetos confeccionados a base de ferro que possuem registros, são objetos que foram encontrados a cerca de 2900 a.C no Egito. Construídas com base principalmente das rochas de minério de ferro, fogueira foram construídas, a fim de proporcionar o contato de partículas do óxido de ferro com partículas muito quentes do elemento carbono, com o resultado de uma massa escura, mas não fundida, iniciando o processo de redução, permitindo sua deformação plástica por meio de técnicas desenvolvidas, de forjamento, de modo a possibilitar a produção de utensílios com propriedades mecânicas diferenciadas (NOLDIN JUNIOR, 2002).

A tecnologia utilizada para a fabricação do ferro, nos momentos atuais, se disseminou pelo mundo. Na sociedade, grandes mudanças foram promovidas em consequência da utilização do ferro, como na agricultura, que pode se desenvolver com rapidez, graças a fabricação de novos utensílios. Uma variedade de todos os povos obteve uma expansão territorial viabilizada pela confecção de armas mais modernas, resultando em uma mudança de interface no mundo. Por meio das fronteiras orientais, deu entrada na Europa, em meados do ano de 500 a.C, e à China, em meados de 400<sup>a</sup>.C. (NOLDIN JUNIOR, 2002).

Para possibilitar a produção dos aços, a metodologia utilizada era com os tarugos em pequenos fornos. Na sequência, eram forjados a quente para formar barras de ferro com melhores propriedades, porém contendo indesejáveis partículas de escória de carvão, mas conferindo maleabilidade. Era considerado aço, as ligas que possuíssem teores de aproximadamente 0,8% de carbono, mas nesta época, idealizavam com teores variando de 0,07 até 0,8%. Processo para tratamento térmico utilizado pelos egípcios próximo a 900 a.C. já eram relativos à metodologia que também utilizamos e conhecemos hoje, para confecção de facas e espadas. Com a invenção de alguns fornos mais engenhosos, a divisão sobre a diferenciação do ferro com o aço foi determinada na Revolução Industrial, pois já era possível corrigir impurezas do ferro além de possibilitar adicionar neles, propriedades como a resistência ao impacto, à corrosão, ao desgaste, etc. Justamente em função do baixo custo e dessas propriedades, o referido aço passou então a representar uma maior

fatia na participação no mercado, em relação aos demais metais consumidos pela indústria, chegando a cerca de 90%. (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2011 apud FELÍCIO, 2012).

Atualmente o aço se apresenta como a liga de maior importância, dentro do cenário atual, sendo aplicada em diversos campos, de maneira intensiva, tais como em máquinas, em construção, ferramentas, etc. No entanto, em consequência das vantagens técnicas que possuem outros materiais, sua utilização fica condicionada a determinadas aplicações. Dentro deste contexto, para título de comparação, temos o alumínio que possui uma maior leveza, melhorando as variáveis quando aplicado como metal estrutural para transporte, sendo selecionado por possuir uma resistência a corrosão maior, e em casos onde necessitam de materiais para aplicações de elevadas temperaturas de trabalho, as cerâmicas. (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2011 apud FELÍCIO, 2012)

Desta forma, levando em conta o custo benefício, atualmente é o aço muito mais utilizado que os demais materiais, muito em função da sua nítida superioridade em relação às demais ligas.

É possível entender este fato já que (VICENTE CHAVERINI, 1977):

- Existem diversas e suficientemente puras jazidas de minerais de ferro, fáceis de explorar, ainda com a opção extremamente eficaz e ecologicamente importante de se reciclar a sucata.
- Os métodos para fabricação são, na maioria dos casos, mais simples e econômicos.
- Uma agradável combinação das propriedades mecânicas apresentadas que, dentro de uma faixa, podem ser modificadas ao variar os componentes da liga e as suas quantidades, ou também através de tratamentos específicos.
- Obtenção de peças com formas geométricas complexas, pelo fato de possuir a característica de plasticidade, corroborando em uma relativa facilidade no processo.
- O histórico já criado perante a sua utilização constante permite prever o comportamento dos aços, de modo a possibilitar na otimização e redução de custos de projetos e em prazos para inserção no mercado.

É de grande importância e de grande influência no desenvolvimento humano,

uma vez que uma grande e considerável parte da história da humanidade, iniciada em 3500 a.C., foi intitulada Idade do Ferro, que de certa forma ainda permanece, e dentro deste contexto, visualizamos a imensurável importância industrial deste material, denominado na metalurgia como siderurgia (CHAVERINI, 1977).

### 3.2 BREVE HISTÓRICO DO AÇO NO BRASIL

Com a construção da empresa Companhia Siderúrgica Belgo Mineira (Sabará, MG), começava a ganhar proporção a indústria brasileira na área da siderurgia, potencializando com a criação da CSN (Companhia Siderúrgica Nacional), em 1941 (PALATNIK, 2011).

O que contribuiu muito no desenvolvimento e pesquisas da tecnologia da construção do aço no território brasileiro foi a criação da FEM (Fábrica de Estruturas Metálicas) em 1953, que pertence à CSN, participando ativamente e construindo importantes edifícios, em estruturas metálicas, de andares múltiplos (DIAS, 1999).

Até meados da década de 60, praticamente toda a produção siderúrgica era consumida no mercado interno, em consequência da quantidade de obras em andamento do próprio governo brasileiro. Desta forma, o polo industrial brasileiro, nesta época, conseguiu de expandir de tal forma, sendo um importante período para o país. O Brasil foi considerado, em 1966, o país a produzir mais aço na América Latina, muito em função dessa expansão. No entanto, em função do lento desenvolvimento, nos últimos 50 anos, do uso do aço na Indústria da construção civil, as obras a utilizar o aço não chegaram a 5% do total disponibilizado, de acordo com o Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA), porém com um considerável potencial de crescimento em virtude das necessidades de ampliação do país (PALATNIK, 2011).

### 3.3 DEFINIÇÃO DOS AÇOS

De forma mais simples, uma definição do aço é aquela que se entende esse material como liga ferro carbono com baixo teor de carbono, podendo ainda conter

impurezas e, em alguns casos, diferentes elementos adicionados como liga. Em resultado disso, visando uma melhor definição, dois outros tipos fundamentais de aço podem ser considerados: os aços-liga, com diferentes elementos de liga adicionados, e os aços carbono comuns (VAN VLACK, 1970).

Podendo possuir pequenas concentrações de alguns elementos residuais vindos dos processos de fabricação, os aços-carbono geralmente possuem de 0,008% até 2,11% em peso de carbono. O percentual de 0,008% em peso representa a máxima solubilidade no ferro do carbono à temperatura ambiente. Já o valor percentual de 2,11% em peso representa o valor máximo de solubilidade do carbono, em uma temperatura de 1148°C, no ferro. (SHACKELFORD, 1999).

### 3.4 DIAGRAMA FERRO-CARBONO

É extremamente importante o domínio dos diagramas de fases para possibilitar e aprofundar análises em ligas, em virtude da existência de uma grande correlação entre as microestruturas presentes e as propriedades mecânicas. Está totalmente associado e relacionado às características do determinado diagrama de fases, o desenvolvimento e comportamento da microestrutura de uma determinada liga. Ainda, os diagramas de fase fornecem muitas informações que são valiosas sobre fundição, fusão e cristalização, entre diversos outros fenômenos (CALLISTER, 2012).

Dos sistemas de ligas binárias existentes e já estudados, o mais usado e mais importante é formado pelos elementos químicos ferro e carbono. Tal como os ferros fundidos bem como os aços são fundamentalmente ligas de ferro-carbono, das quais são os principais materiais, no que diz respeito a ligas estruturais, em toda cultura tecnologicamente avançada (CALLISTER, 2012).

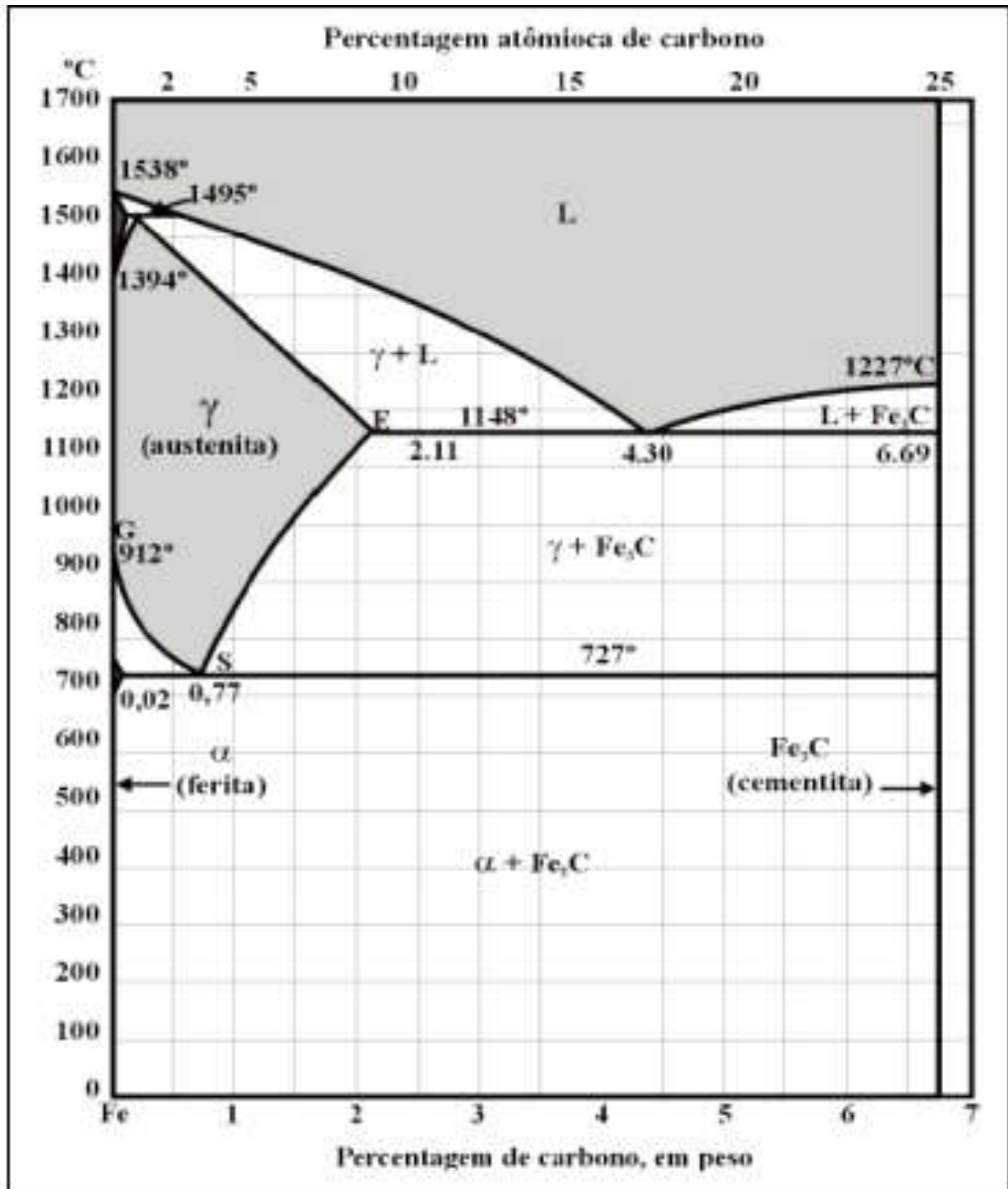
Para aplicação e interesses metalúrgico, as ligas de ferro-carbono são àquelas cujo percentual de carbono presente na liga é inferior a 6,69%. Por definição, quando composto com valores entre 0,02% e 2,11% de carbono, classifica-se como aço, e com valores entre 2,11% e 6,69%, de carbono, são ferro fundido, sendo estes dois as ligas mais importantes destes elementos. O carbono se encontra no aço formando o (Fe<sub>3</sub>C), denominado carboneto de ferro, ao combinar com uma parte do ferro. Esta combinação que contém 6,69% de carbono é também denominado cementita. Este

carboneto encontra-se no estado líquido inteiramente dissolvido na massa líquida, de modo a se formar uma solução homogênea (CALLISTER, 2012).

A linha composta pelos pontos GSE e a linha horizontal de 727° do diagrama da figura 1 marca o início e o término das modificações da textura do aço, quando resfriados ou aquecidos. Caso sejam resfriados lentamente, esta textura se conservará até que a liga atinja a temperatura ambiente, do contrário, obtêm-se texturas compostas. Estas linhas em questão delimitam o que se denomina zona crítica. Em função do carbono possuir uma limitada solubilidade no ferro gama ( $\gamma$ ), de aproximadamente 2,11% em uma temperatura de 1148 °C e, de 0,77% a 727 °C, à medida que se submete a liga ao resfriamento, o elemento carbono, por difusão, passa a precipitar-se nos contornos de grãos de austenita, até o instante onde ocorre a transformação alotrópica para ferro alfa ( $\alpha$ ), do até então ferro gama ( $\gamma$ ), em uma temperatura de 727 °C. Como a ferrita (ferro alfa) forma uma solução pouco extensa com o carbono, no resfriamento ao cruzar a linha de 727 °C, o ferro gama (austenita) transforma-se em perlita, do qual possuem grãos com o formato lamelar de ferro alfa e carboneto em finas camadas alternadas. No caso dos aços que são resfriados lentamente, abaixo da linha horizontal de 727 C temos (SHACKELFORD, 1999):

- Até 0,77% C: aços hipoeutetóides, onde a ferrita se isola ou se precipita junto aos contornos de grãos de austenita resultando em ferrita + perlita;
- Com 0,77% C: aços eutetóides, onde a formação da perlita se dá através da ferrita formada que se envolve à austenita formando lamelas.
- 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).

Geralmente, este diagrama é apresentado até somente o valor percentual de carbono de 6,67%. Um dos motivos é que o carbono e ferro formam o composto denominado cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), que possui percentual de 6,67% de carbono e que é preponderante e muito influente nas ligas ferro carbono (ASKELAND; PHULÉ, 2003).

### 3.5 DESIGNAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS

Conforme já mencionado, as principais propriedades mecânicas dos aços e suas características microestruturais variam em consequência da também variação do teor de carbono por serem sensíveis a este elemento, de modo que, em função das aplicações do aço no mercado, para que a liga apresente configurações que atendam, normalmente são inferiores a 1% em peso do carbono. Os aços podem então ser classificados, em de acordo com essa variação, em grupos baseados nos itens a seguir: processo de acabamento, como no caso dos aços laminados a frio ou também dos aços laminados a quente; quanto a sua composição química, como aços carbono e aços liga; quanto ao produto como acabado, como barras, tiras, chapas finas e grossas, perfis estruturais ou tubos. Uma das classificações mais comum é a que considera a composição dos aços. Entre os sistemas de designação, os mais utilizados são o Instituto de Engenheiros Automotivos (SAE) e o Instituto Americano de Ferro e Aço (AISI). Um outro exemplo de designações adotadas são os da American Society for Testing and Materials (ASTM) (FREIRE, 1989).

Abaixo segue tabela 1 com Classificação dos aços-carbono quanto à composição.

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

Classificação	Teor de Carbono (%)
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).

### 3.6 FASES PRESENTES NO DIAGRAMA FERRO-CARBONO

Verifica-se no diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C 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 e que apresenta estrutura Cubica de Corpo Centrado (CCC). Apenas alguns

átomos de carbono poderão ocupar os sítios da estrutura CCC do ferro em função da baixa solubilidade do carbono na ferrita. A ferrita, desta forma, é a mais macia e dúctil das fases mostradas no diagrama Fe-C (Ferro Carbono), em função dessa baixa solubilidade do carbono. À temperatura ambiente apresenta alongamento de 70%, uma dureza Brinell entre 50 e 100 e um limite de resistência na ordem de 340 MPa (35 kgf/mm<sup>2</sup>). É ferromagnética a temperaturas inferiores a 760 °C.

- Fase  $\gamma$ : denominada austenita, esta fase é uma solução sólida intersticial de carbono em austenita ( $\gamma$ ), em que os átomos de carbono ocupam sítios octaédricos da rede do ferro com estrutura Cúbica de Face Centrada (CFC). Os sítios intersticiais presentes do ferro gama são maiores em relação aos presentes no ferro alfa. Assim, será muito mais elevada a solubilidade do carbono na austenita ( $\gamma$ ) do que na ferrita. Ainda assim, em cada sítio haverá espaço vazio sem que haja deformação da rede. Desta forma, fica limitada a solubilidade máxima com valor percentual de 2,11% em peso de carbono em uma temperatura de 1146 °C. No caso da austenita, a solubilidade de carbono é bem maior, em relação a perlita, o que faz as suas microestruturas e propriedades mecânicas, que variam em função do teor de carbono, terem uma maior variação. Embora menos que a ferrita, esta fase é geralmente macia e dúctil, com valores de limite de resistência entre 686 e 980 Mpa (70 a 100kgf/mm<sup>2</sup>), é tenaz e é não-magnética (PUKASIEWICZ, 2003).

- Fase  $\delta$ : denominada ferrita-delta, esta fase tem características similares em relação a fase alfa ( $\alpha$ ). Em uma temperatura elevada, atinge um valor percentual de 0,10% de carbono em peso a 1492 °C. Nessa fase, é ferromagnética (PUKASIEWICZ, 2003).

- Carboneto de ferro (Fe<sub>3</sub>C): intitulada cementita. A fórmula Fe<sub>3</sub>C corresponde a composição deste composto intermetálico, a cementita, pois o reticulado cristalino possui uma proporção de átomos de ferro e de carbono de 3 para 1. São doze átomos de ferro e quatro de carbono por célula unitária presentes em uma estrutura cristalina ortorrômbica, o que representa um percentual de carbono de 6,67% em peso. Esta é uma fase considerada extremamente dura, com aproximadamente 650 HB, com um limite de resistência com valores superiores a 1960 Mpa (cerca de 200 kgf/mm<sup>2</sup>) e frágil (PUKASIEWICZ, 2003).

### 3.7 AÇO ASTM A36

A ASTM lista uma série de especificações que descrevem aços adequados para diferentes aplicações. Por exemplo, o aço ASTM A131 é um aço estrutural com qualidade marinha de resistência considerável. Já os aços ASTM A283 e A36 se aplicam com maior frequência para peças estruturais. As propriedades físicas dessas peças são bem definidas e podem ser usadas em projetos que exigem dobras e boa soldabilidade. No sistema de 21 classificação ASTM, o aço para aplicação em estrutura é apontado pelo carácter A continuado por dois, três até quatro dígitos. Logo, o aço carbono A36 é altamente utilizado para fins estruturais e gerais. (FREIRE, 1989).

A ASTM A36 determina padronizações de propriedade mecânica, com a visão de produção para fins estruturais, com limites como os de: resistência (fase plástica); escoamento (fase elástica) e alongamento (quanto o produto é esticado). A composição química do ASTM A36, foi projetada para atender aos requisitos de desempenho, para os quais o teor de manganês é especificado com ranges de 0,60% até 0,90% (BELGO, 2018).

### 3.8 AÇO ASTM A572

O descrito aço ASTM A572 gr. 50 foi desenvolvido originalmente para servir às necessidades geradas da indústria de petróleo/gás. Comparado com o aço carbono tradicional, o aço possui valores mais altos de resistência mecânica e tenacidade e excelente soldabilidade. Essas características, combinadas com o progresso do processo de laminação, tornam a ideal seleção para a elaboração de perfis aplicados a estruturas. (MEESTER, 1997).

Os perfis estruturais I e H são encontrados nas normas ASTM A36, ASTM A572 grau 50 e ASTM A572 grau 60. De acordo com a GERDAU S.A., os perfis padrão W e H mais populares são os de aço ASTM A572 gr50. Este aço é caracterizado como aço ARBL e, ao adicionar elementos de liga, até 0,10%, a resistência mecânica pode ser melhorada. O elemento de liga responsável por aumentar essas propriedades é o nióbio (Nb), que promove o refinamento do tamanho do grão na estrutura durante o

processo de laminação usando o TMCP - Thermo-Mechanical Controlled Processed. (SILVESTRE, 2012).

O efeito de controlar o tamanho dos grãos de nióbio é atribuído à sua precipitação, cujo diâmetro é próximo a 300nm, limitando assim o crescimento de grãos no início da laminação. No estágio intermediário de laminação, o nióbio precipitado com diâmetro perto de 50nm minimiza a velocidade da recristalização e obtém austenita deformada. No estágio final de resfriamento, o Nb precipitado (com um diâmetro próximo a 10nm) promove a deformação da rede de cristais. (ICHIKAWA, 2011).

O aço ASTM A572 grau 50 é classificado como aço AR 350 7007: 2016, onde a abreviação AR tem sentido de alta resistência e o número 350 é o limite mínimo exigido em tensão de escoamento.

### 3.9 APLICAÇÃO DOS AÇOS

Este tipo de aço ARBL, possui bastante aplicabilidade no mercado da construção civil, indústria e transporte, como por exemplo no transporte de petróleo com presença de H<sub>2</sub>S. As grandes possibilidades de aplicação do aço fazem dele muito popular, e justifica-se por dispor de boas resultâncias a respeito de suas propriedades mecânicas, variando conforme sua organização química e de desiguais tipos de material. (GORNI, MEI, 2004).

Um dos grandes trunfos dos aços de alta resistência/baixa liga é que, quando submetidos a ambientes extremamente agressivos, como locais próximos a orla marítimas ou ambientes que apresentam poluição por dióxido de enxofre, a aplicação de uma pintura, irá conferir um desempenho muito superior do que se fosse aplicado em aços carbono comum, que não apresentam uma característica anticorrosão tão boa. (GORNI, MEI, 2004).

#### 3.9.1 Aços carbono

O aço carbono não insere intencionalmente mais elementos, contendo apenas

carbono e quatro elementos residuais que geralmente são encontrados no aço e situam-se em sua composição no decorrer do processo de fabricação do aço, isto é, silício, manganês, enxofre e fósforo. O aço é conhecido como uma liga com ferro apresentando a maior porcentagem de peso. O aço-carbono comumente usados tem 0,008% a 2,06% de carbono em peso. O carbono é o componente mais influente na liga Ferro Carbono, que determina o tipo de aço obtido. Quanto mais superior o teor de carbono, maior será a dureza do aço, maiores serão os limites de: resistência e escoamento, e será mais frágil. Uma maneira de classificar esses aços em relação ao carbono é: baixo teor (0,10% até 0,30% C), teor médio (0,30% a 0,85%C) e alto teor (0,85% até 1,50%). Quando o teor de carbono é superior a 1,5%, o aço comumente não é produzido ou fabricado comercialmente, com algumas exceções (SOUZA, 1989).

Os aços de alto e médio carbono apresentam alta fragilidade, apresentam temperabilidade, soldabilidade mais baixa, baixa características de conformabilidade e se retratam mais frágeis após o processo de soldagem. Suas limitações resumem-se em: uma resistência mecânica mais baixa, uma temperabilidade mais baixa, uma resistência a corrosão mais baixa, resistência ao desgaste em altas temperaturas mais baixas, baixa temperatura de decomposição da martensita e baixa resistência à oxidação. (CALLISTER, 2011)

Os aços baixo carbono possuem, geralmente, baixas dureza, resistência mecânica e altas ductilidade e tenacidade. Além disso, são bastante soldáveis, usináveis e retratam custo reduzido de produção. Estes referidos aços muita das vezes não são tratados com incidências térmicas. Dentre as suas típicas aplicações estão os perfis estruturais, chapas para indústria automobilística, placas para utilização na fabricação de tubos e latas de folhas-deflandres. (CALLISTER, 2011)

Os aços com porcentagens medianas de carbono detêm uma necessária quantia de carbono para a efetuação de ensaios e tratamentos térmicos como: revenimento e têmpera, posto que seus respectivos tratamentos térmicos necessitem ser efetuados com taxas elevadas de resfriamento e em finas seções para serem efetivos. Possuem descrições de maiores dureza e resistência e menores ductilidade e tenacidade em relação aos aços baixo carbono. (CALLISTER, 2011).

### 3.9.2 Aços estruturais

São de extrema importância na indústria da construção civil por suportarem grandes carregamentos e possuírem alta resistência mecânica. Estas são algumas das características que a construção civil exige, como também possuírem facilidade de fabricação e preço competitivo. Praticamente nenhum outro material entrega uma melhor combinação desses requisitos além do aço. (CHIAVERINI, 2012).

Normalmente, os aços estruturais são aços carbono com reduzidas porções de elementos de liga, que são características encontradas em aços ARBL com a relação alta resistência e baixa liga, que especificam limites em propriedades mecânicas e composição química. Ao dar início um projeto para utilização de um aço estrutural, se deve levar em conta diversos aspectos que vai desde ao conforto, durabilidade, estabilidade a segurança, estabelecendo assim margens de segurança para evitar perda de estabilidade, flambagem, deterioração por fadiga e ruptura. (GORNI, 2008).

A resistência dos materiais estruturais tem de ser majoradas. Já em relação aos estados de vibração, corrosão, deformação excessiva, limites de serviço devem ser minorados. Além de levar em consideração de forma retilínea a incidência de cargas acidentais e permanentes, e indiretas como recalques e retração, temperatura e ainda assim existem os fenômenos naturais como terremoto, maremoto. (CHIAVERINI, 2012)

### 3.10 INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS DE LIGA NOS AÇOS

Geralmente, a inclusão de elementos é comprovada através de vários relacionamentos. Uma pequena quantidade de elementos adicionados melhorará significativamente o desempenho do aço. O carbono retrata uma ampliação da dureza, desenvolvendo assim a resistência relativa ao desgaste e corte. A soma de demais elementos de liga é capaz de aumentar a resistência mecânica ou tenacidade.

Com o ANEXO A é possível visualizar como se caracteriza a influência que determinados elementos de liga podem causar nos aços.

### 3.11 MANGANÊS (Mn)

O manganês está presente em todos os aços porque é amplamente utilizado como desoxidante e dessulfurizador. Quando o teor é superior a 1% em peso, a possibilidade de fragilização por hidrogênio aumenta. Este efeito pode ser resolvido por tratamento térmico e revenimento. Isso é muito importante para diminuir a temperatura de transição entre dúctil-frágil e, por isso, com aptidão à fratura quebradiça. (BEIDOKHTI et al., 2009; NICODEMI, 2010; TISZA, 2002).

De uma concepção generalizada, aportes de manganês ao aço (NICODEMI, 2010):

- Aumentam a estabilidade da austenita;
- Restringem a temperatura de recozimento e também de revenido;
- Diminuem a velocidade crítica de têmpera para que a têmpera possa ser realizada em óleo;
- A temperabilidade aprimorada;
- A ductilidade a frio do aço perlita é restringida, por isto, a proporção de manganês do aço empregado para trefilação não deve exceder 0,6%, no máximo.

Segundo Beidokhti et al. (2009), posterior ao adicionamento de manganês, o mesmo comunica-se com o enxofre para formar o MnS, podendo incentivar a formação de trincas em ambientes contendo hidrogênio. Essas inclusões de MnS tendem a segregar na linha central e levam à heterogeneidade do aço após a laminação, exigindo a adição de cálcio para alterar a morfologia do composto. Também deve ser enfatizado que o autor constatou que o conteúdo de manganês secretado na área central é um elemento essencial que causa fragilização por hidrogênio. De acordo com o controle de Ro (2000), o conteúdo de manganês deve ser controlado abaixo de 1,5% do peso de Mn, mas é contraposto por Kushida et al. (1997), o mesmo descobriu que não havia rachaduras na correia de separação do aço de microliga API X80, que continha 2,03% em peso de Mn.

### 3.12 NIÓBIO (Nb)

O nióbio (Nb) foi localizado pelo químico britânico Charles Hatchett em 1801 ao explorar um particulado mineral chamado columbita, originalmente chamado columbium (Cb), e mais tarde em 1844 foi renomeado como Nb pelo alemão Hein Heinrich Rose. Ele acreditava erroneamente que havia encontrado um elemento desconhecido. Em 1950, a IUPAC - União Internacional de Química Pura e Aplicada - adotou claramente o nome nióbio. Embora a União Internacional de Química recomende o nome nióbio, alguns usam termos coloquiais. A baixa parcela proporcional de 24 partes por milhão é um dos elementos de concentração mais baixos da costa. Nióbio - Nb é o componente químico localizado na tabela periódica na posição de 41, de elementos químicos, presente no quinto período, no grupo 5, sua densidade é 8,57 g / cm<sup>3</sup>, seu grau de dureza Mohs é 6 e a razão é de 1 a 10 e é classificado como metais de transição. (GRIFFITH, 2003)

O metal refratário Nb apresenta alta tenacidade e alta resistência à corrosão. Devido às suas características únicas e à sua singularidade, possui um enorme potencial de aplicação nas indústrias de alta tecnologia e aço, bem como em máquinas, automóveis, aeroespacial e outras indústrias. (MME, 2010; KAISER, 2015).

No Brasil, os recursos e reservas de nióbio totalizam aproximadamente 850.000 toneladas (IBRAM, 2011), concentrados principalmente nos seguintes estados: Minas Gerais (75%), localizada em Araxá. Amazonas mais preciso em São Gabriel da Cachoeira (22%); Goiás em Catalão e Ovidor (3%). (DNPM, 2011).

### 3.13 INFLUÊNCIA DO NIÓBIO NO AÇO ARBL

Após sua notoriedade no século 20, o Nióbio justificou-se ser aplicado por algumas características. (MEYER, 2001):

- A Pouca afinidade com oxigênio;
- A imprescindível solubilidade na austenita;
- A boa interação com os elementos nitrogênio e carbono;

- O enorme potencial para formação de precipitados na ferrita e austenita.

As ponderações descritas nos quatro tópicos acima, confirma que o Nióbio obtém um perfil natural para exercer o posto de um elemento com peculiaridades microligante, conforme característico no ganho de drásticas alternâncias nas especificidades mecânicas do aço apostado com incremento em proporções infinitesimalmente ínfimas ao ser comparado com o crescimento de demais elementos de liga, como Carbono, cromo, molibdênio, manganês, por exemplo.

Entre os vários efeitos do nióbio no aço ARBL através do processamento em laminação a quente termomecânica, o mais significativo é o nióbio, que controla as propriedades mecânicas. De forma precedente do aquecimento em direção a fase austenítica finalizada, o aço contendo nióbio deve existir na forma de solução sólida e na forma de precipitação com NbCN. Nos dois casos, devido ao seu desempenho, ele poderá atrasar a transformação dessa fase em ferrita durante o resfriamento subsequente. (DEARDO, 2001).

O resultado final mais significativo do Nb nas virtudes do aço microligado pode ser resumido da seguinte maneira (MEYER, 2001):

- Reduzir o tamanho dos grãos de ferrita;
- Retardamento da recristalização;
- Endurecimento por precipitação nas disposições da matriz ferrítica.

Portanto, apesar de trabalhos como Gladman (1997) e Meyer et al. (1997), que esse elemento do mesmo modo pode lapidar a resistência do aço apurando o refinamento dos grãos por meio de solução sólida. Discordando, Doñu Ruiz et al. (2012) e Itman et al. (1997) confiavam que o nióbio propiciava maior resistência pelo meio do próprio mecanismo de precipitação. Embora existam três mecanismos de endurecimento associados a esse elemento, o tamanho dos grãos de ferrita na microestrutura final afetará suficientemente as singularidades mecânicas do aço microligado em razão dos grãos ultrafinos (ou seja, grãos de cerca de 1-3  $\mu\text{m}$ ) e produzirá grãos maiores. Força, submissão a tensão e resistência associado ao escoamento e outros artifícios de endurecimento podem esmaecer o exercício deste (KUNDU et al., 2011).

Além disso, despontou que a soma de uma sucinta fração de Nb pode lapidar a soldabilidade em confronto com o aço ARBL convencional. (ELWAZRI et al., 2005; RIOS, 2007).

### 3.14 PARÂMETROS ESTRUTURAIS

Quando a análise do aço ARBL e aço carbono manganês é realizada de forma isolada, verifica-se uma larga vantagem no que diz respeito a relação resistência/peso entre os materiais.

Como é de conhecimento, ambos os aços têm como priori a aplicação em projetos estruturais, ou seja, edifícios, estruturas de equipamentos, plataformas de petróleo e dentre outras aplicações. (LUZ, GELSON, 2017).

Com base na composição dos seus elementos de liga, pode-se verificar alguns elementos em comum como: carbono, enxofre, manganês, fósforo entre outros, de acordo com a tabela 5. Mas, uma particularidade que o aço ARBL apresenta em dessemelhança ao aço carbono manganês é a presença do elemento de liga Nióbio (Nb), mesmo que em escalas infinitesimais.

Dispondo de configurações iniciais de projeto iguais aplicadas aos dois aços, pode-se identificar no aço ARBL uma redução considerável do peso estrutural final sem que haja uma perda de suas propriedades ao que está configurado, visto que será necessário uma menor quantidade, no projeto, do aço com adição de nióbio, conforme descrito nos itens 5.3 à 5.6.

Nos dias atuais, a questão custo de aplicação de um determinado material dever ser dada sua devida importância, visto que a redução de aporte financeiro atrelado a confiabilidade de um projeto, está cada vez mais sendo ponderado. Deste modo, a seguir, na tabela 2, é apresentado uma folha de dados de acordo com as especificações técnicas de perfis estruturais.

**Tabela 2** - Especificações dos perfis do aço ARBL e aço carbono manganês

Material	Limite de Escoamento	Bitola (mm x Kg/m)	Massa Linear (Kg/m)	Preço
ASTM A36	250 Mpa	W150 x 13,0	13,0	R\$ 4,33
		W200 x 46,1	46,1	R\$ 4,23
		W610 x 125,0	125,0	R\$ 4,06
ASTM A572	345 MPa	W150 x 13,0	13,0	R\$ 5,16
		W200 x 46,1	46,1	R\$ 5,06
		W610 x 125,0	125,0	R\$ 4,89

Fonte: GERDAU (2020).

### 3.15 TRATAMENTOS TÉRMICOS DOS AÇOS

Os aços também são as ligas metálicas mais adequadas para operações de tratamento térmico, porque sua estrutura durante essas operações sofrerá mudanças profundas, resultando em suas propriedades com significado importante para aplicações industriais e de engenharia. (CHIAVERINI, 2003).

O tratamento térmico são procedimentos de aquecimento e resfriamento às quais os aços são expostos sob condições moderadas de tempo, atmosfera, temperatura e taxa de resfriamento, com o propósito de modificar suas propriedades ou fornecer características específicas. O comportamento do aço resulta de sua estrutura em princípio. O tratamento térmico modifica a estrutura do aço, fazendo com que suas propriedades mudem significativamente. (CHIAVERINI, 2003).

Existem basicamente três possibilidades para adaptar as propriedades mecânicas, físicas e tecnológica do material às condições específicas de trabalho: (a) O material admite deformação plástica (extrusão, forjamento, alongamento, estampagem, laminação etc.); (b) O processo de formação química do material (oficina de fusão, fundição, etc.); (c) O uso de materiais térmicos para ciclagem, isto é, tratamento térmico (têmpera, recozimento, normalização, etc.) (CALLISTER, 2008).

Tratamento térmico é um composto de operações de resfriamento e aquecimento a que os materiais, sobretudo os aços, sob condições moderadas de tempo, atmosfera, temperatura do ambiente circunvizinho e, posteriormente, rapidez de resfriamento, com o foco de mudar as suas propriedades ou conferir-lhes

propriedades para atender a situações específicas (CHIAVERINI, 2003).

### 3.15.1 Recozimento

Durante o processo de recozimento, o aço é conformado a altas temperaturas por um certo período de tempo e depois é resfriado lentamente. Esse processo geralmente é usado para aumentar a ductilidade do material, aliviar tensões e tornar mais tenaz a fabricação de microestruturas específicas. (CALLISTER, 2008).

O recozimento pode ser subdivido em cinco tratamentos específicos (CHIAVERINI, 2012):

- Recozimento completo: resume-se o aquecimento da peça a uma temperatura de 50° C além da linha A3 para alcançar o nível de aço eutetoide. Logo para aço com um teor superior a 50 ° C acima da linha A1, o suficiente para transformar completamente a austenita. Em seguida, esfrie lentamente dentro do forno e em temperatura ambiente. A microestrutura processada por esse método possui pouca resistência e perlita dúctil (CALLISTER, 2008).
- Recozimento isotérmico: O processo de aquecer o material com os mesmos parâmetros que o recozimento completo e, posteriormente, resfriá-lo rapidamente até a temperatura na região acima da curva TTT (Tempo – Temperatura – Transformação), permanecendo a peça completamente modificada e, em seguida, resfriando continuamente. A microestrutura resultante é apenas perlita e cementite, perlita e ferrita ou perlita. A vantagem desse método é que ele é mais rápido que o método anterior e produz uma estrutura mais uniforme, porém a taxa de resfriamento do interior e da extremidade de um material robusto é diferente, o que dificulta a temperatura de transição, isso não é mostrado para blocos de seção transversal grandes. (CHIAVERINI, 2012).
- Recozimento para aliviar o estresse ou subcriticalidade: de acordo com Colpaert (2008, p. 262), "Este tratamento destina-se a reduzir ou eliminar o estresse residual e é geralmente usado após a soldagem, após a solidificação, e após a usinagem". Esse processo ocorre ao aquecer o aço abaixo da temperatura crítica a aproximadamente 500 a 800 ° C, dependendo da seção transversal do aço e das peças. (CHIAVERINI, 2012).

- Esferoidização: Este processo visa melhorar o desempenho de corte de aço médio carbono e aço alto carbono e melhorar a severa deformação do aço carbono baixo no processo de moldagem. O processo subsequente de aquecimento e resfriamento para produzir uma estrutura esférica ou esférica de carbonetos no aço. (ASKLAND, 2008). O processo pode ocorrer de três métodos diferentes: aquecendo o acima da linha A1 e depois resfriamento lento; aquecimento demorado a uma temperatura abaixo da linha A1; e aquecimento e resfriamento alternados em temperatura logo acima e abaixo da linha A1 (CALLISTER, 2008).
- Recozimento em caixa: Este método é utilizado para proteger contra oxidação e outros efeitos normais deste tratamento térmico. Este método é aplicado em chapas e tiras de aço, para produção de uma recristalização da ferrita, após laminação a frio (CHIAVERINI, 2012).

### 3.15.2 Normalização

A normalização envolve o aquecimento da peça a uma temperatura acima de aproximadamente 100°C da zona críticas e, posteriormente, o resfriamento até a temperatura normal no ar. (SEVALE apud FREIRE, 1983, p.22). Para os aços hipoeutetóides, a temperatura excede a linha Ac3, já no caso dos aços hipereutetóides, excede a linha Acm. Esse tem como objetivo refinar os grãos grosseiros de aço, de modo que o material possa adquirir uma estrutura mais uniforme e, desta forma, reduzindo a tendência de deformação durante a têmpera, o que é benéfico para o processamento de peças. (CHIAVERINI, 2012).

### 3.15.3 Têmpera

A têmpera é um processo destinado ao aço para obtenção de dureza e aumento da resistência, tende a tornar o material excessivamente rígido - conferindo pouca elasticidade (frágil), baixa resistência ao choque, e criando tensões no interior, que são corrigidas pelo revenido. (CHIAVERINI, 2003).

O objetivo básico das ligas de ferro-carbono temperado é conferir uma estrutura de martensita, que necessita de um resfriamento rápido para evitar a

conversão da austenita em seu produto normal. Para aços hipoeutéticos, eleva a temperatura de 50°C acima de A1 para aços hipoeutetóides, e abaixo da linha Acm para aços hipereutetóides (a cementita gerada é dura). O tempo depende da seção transversal da peça de trabalho e, em seguida, resfria rapidamente em óleo, água salgada ou até ar. Sob essas condições, a taxa de resfriamento dependerá do perfil de aço, do modelo e do tamanho da peça. Este procedimento objetiva elevar a dureza do aço. (CHIAVERINI, 2003)

Está diretamente associado às propriedades mecânicas do aço a sua microestrutura, de modo a afetar diretamente na ductilidade, dureza, tenacidade e resistência mecânica. Diversos usos possíveis do aço requerem diferentes combinações de características, que podem ser obtidas modificando as características do aço, tornando seu uso mais eficaz e seguro. Uso de tratamentos térmicos, como têmpera para alterar a microestrutura e as propriedades do aço, para alcançar a aplicação desejada. O principal resultado da têmpera é elevar a dureza e a resistência mecânica do aço, aumentar a temperatura do aço para transformar sua estrutura em austenita e, em seguida, esfriar repentinamente para formar uma estrutura de martensita. (CHIAVERINI, 2012).

Condições de alta tensão, dureza martensita extremamente alta e deformação de treliça aumentam os inconvenientes e devem ser aliviadas ou corrigidas. Para isso, o aço temperado é revenido, cujo objetivo é reduzir ou eliminar completamente a tensão e corrigir a dureza excessiva e as características de enfraquecimento do material que o acompanha, bem como as propriedades após a têmpera para melhorar o aço, a resistência ao impacto e ductilidade. (CHIAVERINI, 2003).

A figura 2 demonstra as etapas do procedimento para realização do tratamento térmico de têmpera.

#### 3.15.3.1 Temperabilidade

A temperabilidade é um atributo das ligas de ferro, ou seja, a partir de uma elevada temperatura, na chamada taxa de resfriamento crítico, a liga de ferro é basicamente modificada em martensita, fácil de resfriar e temperar. A temperabilidade condiz à capacidade de um determinado material se modificar parcial ou totalmente

do estágio de austenita em uma porcentagem de martensita a uma definida profundidade submetida a resfriamentos sob certas condições (PATROCÍNIO, 1999).

### 3.15.3.2 Martensita

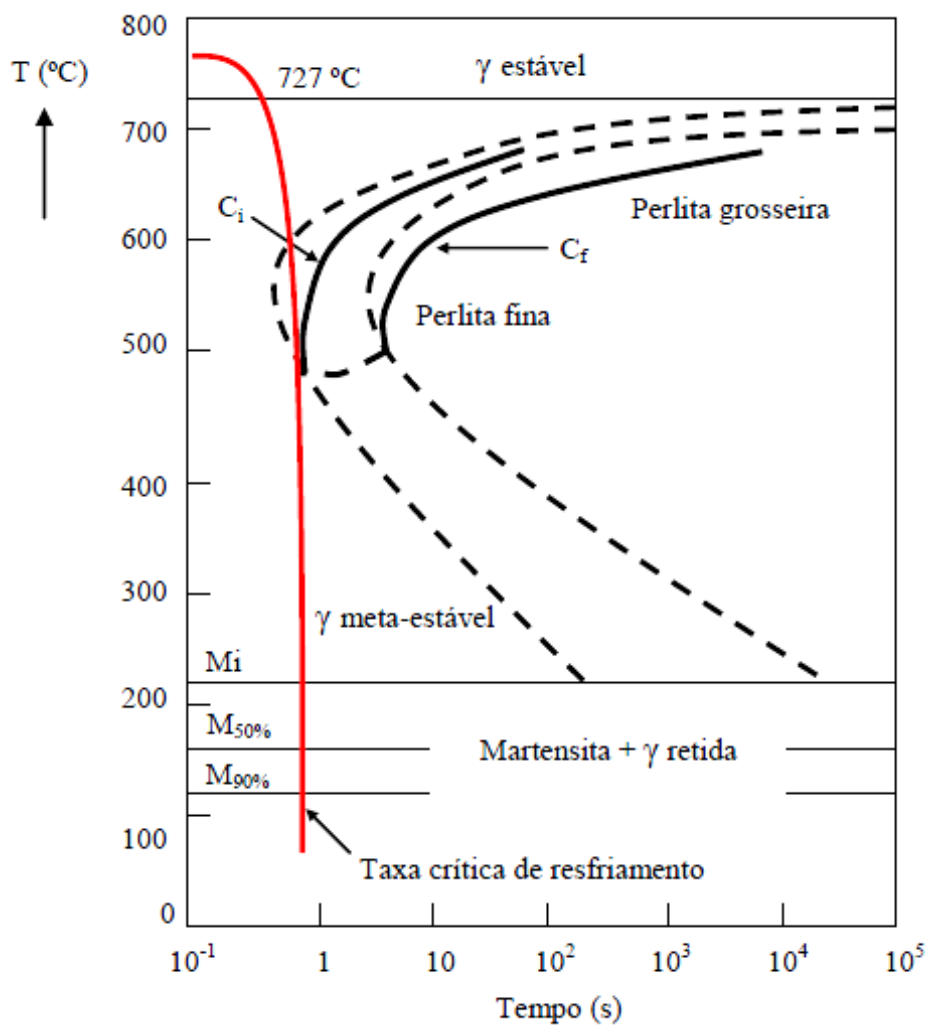
Martensita é uma fase produzida pela transformação por difusão de austenita durante o resfriamento. Essa modificação é realizada por uma redução repentina de temperatura, caracterizada pelo fato de que átomos de carbono e outros componentes de liga de metal não têm tempo para separar as duas fases de ferrita e cementita formadas em outras circunstâncias diferentes (KRAUSS, 2000).

Para que o procedimento de têmpera obtenha êxito, vários elementos devem ser considerados. Inicialmente, a taxa de resfriamento deve impedir a alteração da austenita em altas temperaturas. De fato, essas transições (se ocorrerem) resultarão em uma estrutura híbrida que, além de fornecer baixos limites de escoamento e resistência ao impacto, também levará a pontos fracos. Portanto, a seção transversal do material é outro fator importante, pois pode determinar a diferença de resfriamento entre a superfície e o interior. (CHIAVERINI, 2003).

Neste contexto outras ferramentas relevantes, são os diagramas ou curvas TTT, conforme figura 2 e de TRC (Transformação por Resfriamento Contínuo), conforme figura 3, como exemplo, que mostram as transformações da austenita em função do tempo e temperaturas constantes, e em função de taxas de resfriamento (KRAUSS, 2000).

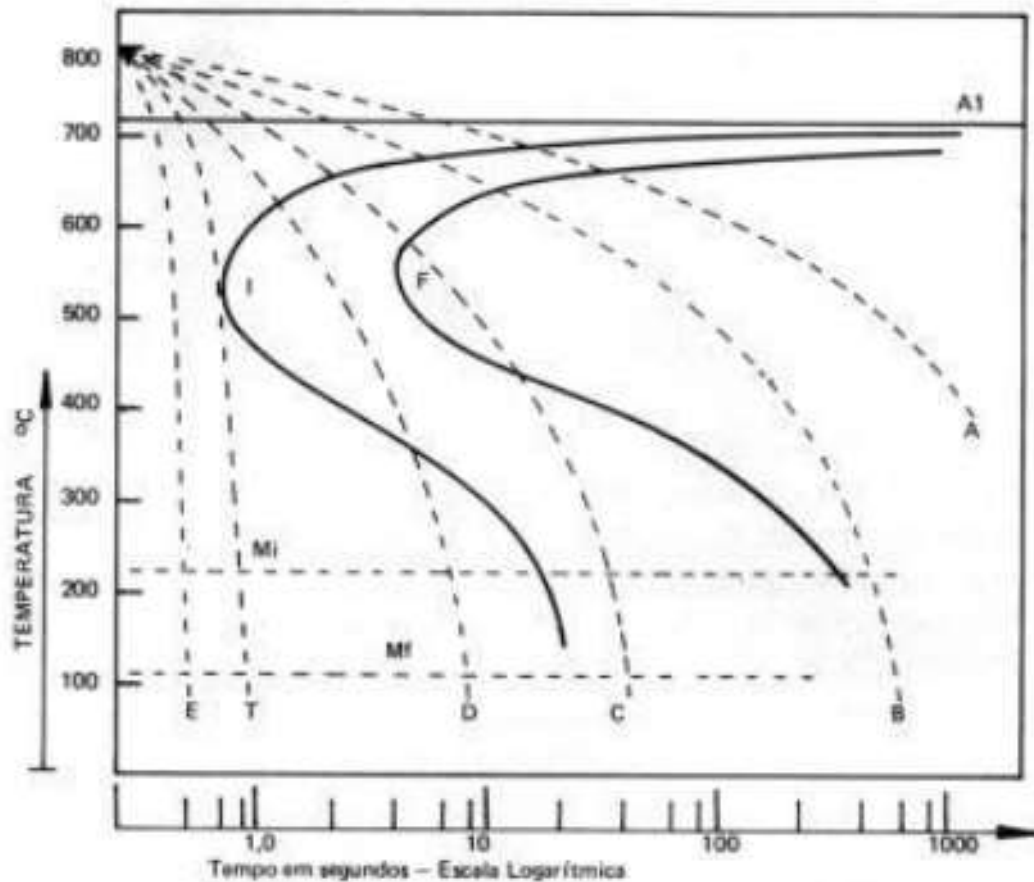
Segundo Chiaverini (2008), o resfriamento contínuo feito sob altas velocidades é chamado de têmpera e produz estruturas bem definidas como a martensita. Se resfriados de modo mais lento se obtém a perlita grossa ou perlita fina conforme mostrado na figura 3. O tratamento utilizado para obtenção de perlita fina é chamado de normalização.

**Figura 2** - Representação esquemática de um tratamento térmico de têmpera.



Fonte: CALLISTER (2008).

**Figura 3** - Superposição de curvas de resfriamento no diagrama de Transformação por Resfriamento Contínuo.



Fonte: CHIAVERINI (2008).

### 3.15.3.3 Meios de resfriamento para têmpera

A baixa taxa de resfriamento fará com que os componentes normais da austenita se dividam (perlita, cementita e ferrita), o que resultará uma alteração nas características mecânicas do aço, mas não é semelhante ao efeito que pode ser alcançado pelo acelerado resfriamento da austenita. Essas transições lentas são uma função da mudança de ferro da rede e dependem da difusão de átomos através da austenita, que é um estágio que leva tempo para ser concluído. No entanto, se a taxa de esfriamento for aumentada, não haverá tempo para os átomos se difundirem completamente e a alteração de fase da austenita mudará, formando a martensita. (VAN VLACK, 1984).

A severidade do tratamento térmico refere-se à capacidade do fluido e fluido de resfriamento de metal absorver o calor do aço aquecido. Quanto maior a força do

meio, maior a deformação da peça (PATROCÍNIO, 1999). O método de resfriamento mais comum é líquido ou gás. Para líquidos, o mais aplicado é água e óleo (CALLISTER, 2008):

O resfriamento mais lento é efetuado quando resfriado no ambiente do forno e se torna mais rigoroso quando retirado deste e resfriado ao ar ou líquido. Neste caso, submeter a amostra a uma agitação da origem aos meios mais severos. (CHIAVERINI, 2003).

A solução líquida é recurso de resfriamento mais vigoroso e com o menor custo. Portanto, são meios preferenciais, desde que essas peças tenham uma forma que não ocasione deformação exagerada ou até rachaduras durante a têmpera. (CHIAVERINI, 2003).

### 3.16 REVENIMENTO

Imediatamente após o resfriamento, o aço temperado é revenido de um calor baixo para uma temperatura próxima à linha A1 a uma temperatura inferior da zona crítica. A temperatura será selecionada com base no resultado final desejado e no valor de dureza definido (somente alívio de tensão ou alívio de tensão completo), que determinará a transformação estrutural de acordo com o limite de aquecimento da martensita e, portanto, o fim do material de desempenho. (CHIAVERINI, 2003).

### 3.17 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS

Em uso, bastantes materiais são submetidos a forças ou carregamentos, por isso é necessário compreender as características dos materiais. (CALLISTER, 2012).

As características mecânicas dos elementos, refletem a relação entre a resposta ou deformação à carga ou força. As propriedades mecânicas importantes do projeto são: rigidez, resistência ao desgaste, dureza, ductilidade e tenacidade. Através de ensaios de laboratório cuidadosamente programados para verificar as propriedades dos materiais, esses testes podem reproduzir as condições de uso (ASTM, 2010).

### 3.17.1 Ensaio de impacto

O ensaio de impacto é um procedimento dinâmico utilizado para analisar fraturas quebradiças em materiais e pode verificar diferenças no comportamento do material que não podem ser observadas em outros testes. (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012). Os testes de impacto foram projetados e ainda são usados hoje para medir a energia assimilada por um material antes da quebra. Para o ensaio, a amostra precisa ser confeccionada com uma seção quadrada (CALLISTER, 2012).

### 3.17.2 Dureza

A resistência mecânica e o aumento da dureza dos aços estão associados principalmente ao também aumento do teor de carbono. 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. (PANDOLFO, 2009).

#### 3.17.2.1 Dureza Rockwell

Os ensaios Rockwell, um dos mais utilizados em todo o mundo, por se tratar de uma metodologia muito simples para a realização do ensaio. O ensaio é realizado a partir de um penetrador padrão, podendo possuir diferentes geometrias que varia em função do material que será ensaiado. O que também varia em função do material ensaiado são as escalas que podem ser utilizadas que irão se alternar de acordo com os penetradores, carga a ser aplicada e material a ser ensaiado, buscando permitir a realização da medição em diferentes tipos de materiais. A magnitude da dureza é explicitada em função da diferença na profundidade submetida pelo penetrador oriunda da carga inicial que foi aplicada, seguida de outra carga posterior e maior, denominada carga principal. (CALLSITER, 2008). No ensaio Rockwell, a carga de menor valor é de 10 Kgf, e as cargas principais podem variar entre os valores 60 e 150 Kgf. O número que irá expressar o valor da dureza Rockwell deve possuir o prefixo HR para indicar ser dureza Rockwell e um sufixo que indicará a escala que pode ser A, B e C, como nota-se no quadro 1 (GARCIA, 1999).

**Quadro 1** - Relação penetrador, cargas para ensaio e materiais.

Escala	Penetrador	Carga (Kg)	Materiais Ensaados
<b>A</b>	Brale	60	Material duro e outros muito duros, aço endurecido superficialmente com pequena espessura de camada
<b>B</b>	Esfera de 1/16"	100	Aços moles, ligas não-ferrosas duras (de cobre e alumínio)
<b>C</b>	Brale	150	Aços de alto limite de resistência a tração (acima de 60kgf/Nm <sup>2</sup> ; aços endurecidos superficialmente com camada espessa
<b>D</b>	Brale	100	Materiais com camada superficial endurecida média, tais como aços cementados; ferro maleável perlítico
<b>E</b>	Esfera de 1/8"	100	Materiais moles, ligas de alumínio e magnésio; ligas para mancais; ferro fundido
<b>F</b>	Esfera de 1/16"	60	Ligas cobre recozidas; chapas metálicas finas moles
<b>G</b>	Esfera de 1/16"	150	Bronze fosforoso; ligas Cu-Be; ferro maleável
<b>H</b>	Esfera de 1/8"	60	Alumínio, chumbo, zinco

Fonte: CHIAVERINI (1986) - adaptado pelos autores.

### 3.17.2.2 Dureza Vickers

Este método de medição de dureza, também conhecido por muitos como teste de dureza de pirâmide de diamante, foi introduzido em 1925 e relaciona a área superficial da impressão com a carga aplicada. O penetrador é uma pirâmide composta de diamante com sua base quadrada e com faces opostas cujo possuem um ângulo de 136° entre si. Este ensaio permite realizar as medições em todos os materiais metálicos ainda que possuam quaisquer durezas, porém mais aplicados em materiais com a sua dureza mais elevada, ou corpos de prova com pequenas espessuras, com geometrias difíceis (GARCIA, 1999).

A forma que se dá a impressão é de um losango cujo duas de suas diagonais devem ser medidas, através de um microscópio que está acoplado ao equipamento de medição e, a magnitude da dureza. A média entre essas duas medidas das diagonais serão usadas para determinar o valor da dureza Vickers, que é dada pela equação 1. (GARCIA, 1999):

$$HV = \frac{0,102 \times 2 \times P \times \sin(\theta/2)}{d^2} \quad (1)$$

$$HV = 0,189 \times \frac{P}{d^2}$$

Onde:

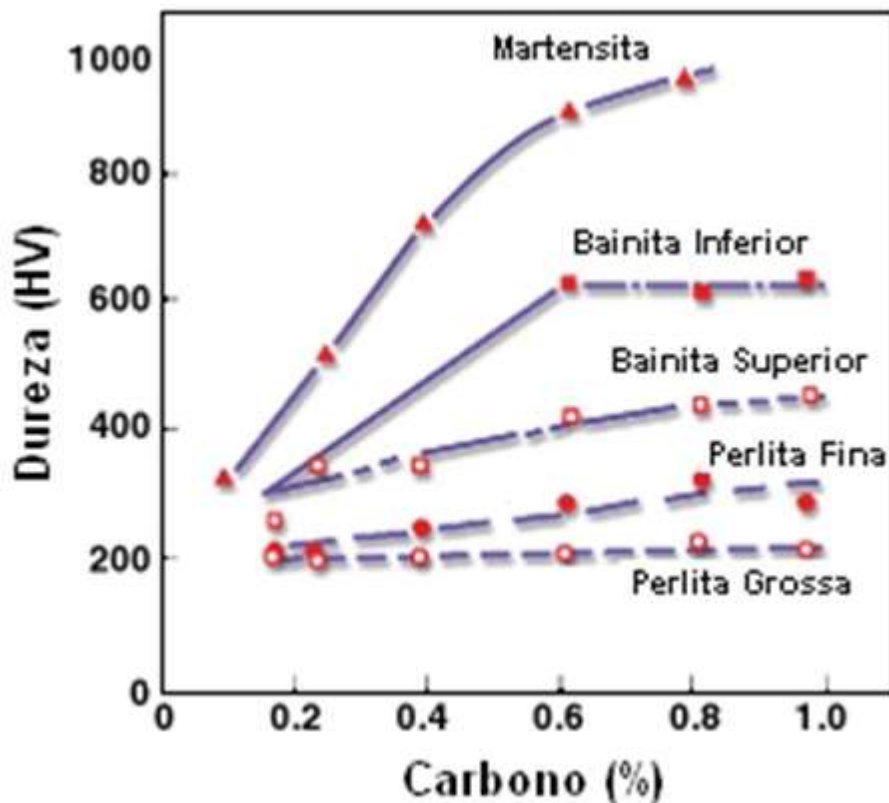
$P$  = carga (N);

$d$  = comprimento da diagonal da impressão (mm) e  $\theta = 136^\circ$ .

Porém, já existem tabelas que entregam os valores da dureza Vickers em função das leituras das diagonais que foram desenvolvidas na impressão formada durante o ensaio, eliminando a necessidade de utilização da expressão para calcular HV (GARCIA, 1999).

A figura 4 permite a verificação do microconstituente formado em função da dureza verificada através do ensaio de dureza Vickers.

Figura 4 - Relação dureza x Teor de carbono fases



Fonte: HATCH GROUP (2005).

Ainda, para possibilitar a conversão da dureza Rockwell para dureza Vickers, utiliza-se a tabela 3.

**Tabela 3** - Tabelas de conversão de dureza vickers para dureza rockwell B

Dureza Rockwell B	Dureza Vickers	Dureza Rockwell B	Dureza Vickers
HRB	HV	HRB	HV
109	354	82	156
108.5	345	81	153
108	336	80	150
107.5	327	79	147
107	318	78	144
106	310	77	141
105.5	302	76	139
104.5	294	75	137
104	286	74	135
103	279	73	132
102.5	272	72	130
100	240	71	127
99	234	70	125
98	228	69	123
97	222	68	121
96	216	67	119
95	210	66	117
94	205	65	116
93	200	64	112
92	195	63	112
91	190	62	110
90	185	61	108
89	180	60	107
88	176	59	106
87	172	58	104
86	169	57	103
85	165	56	101
84	162	55	100
83	159	54	-

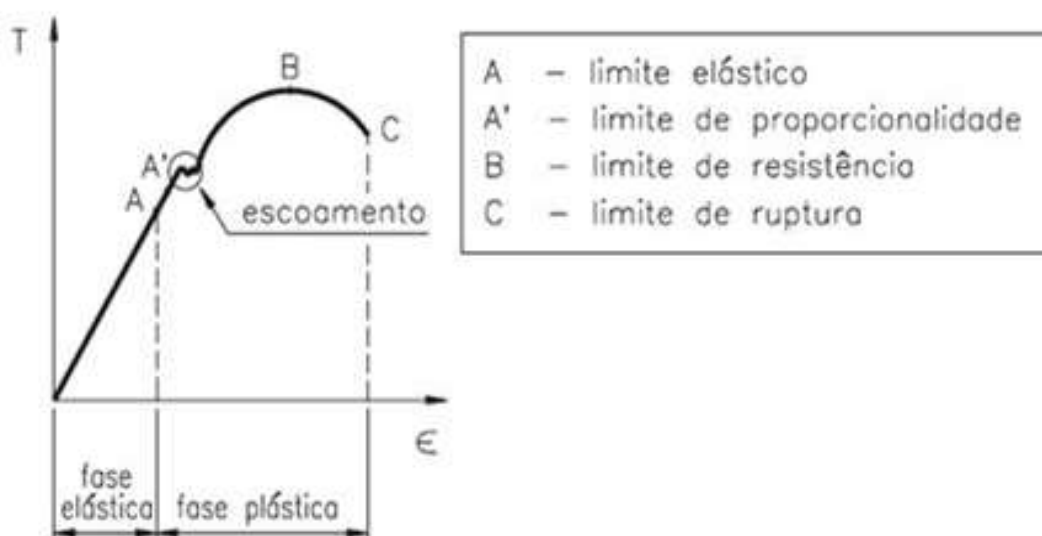
Fonte: METALFITAS (2020).

### 3.17.3 Tração

A resistência de um material está relacionada com à sua capacidade de suportar cargas sem fraturas ou deformações excessivas. Essa característica é inerente ao material e pode ser entendida por procedimentos experimentais, por exemplo, ensaio de tração. Esta é uma das experiências mais importantes, porque as várias propriedades mecânicas do material podem ser determinadas, e um dos testes mais importantes é a tensão normal média (HIBBELER, 2010).

O teste é resumido como o uso de cargas de tração uniaxiais (geralmente padronizadas) na amostra, onde a deformação é distribuída uniformemente ao longo da amostra até que ela se quebre. A deformação gradual ao longo do CP (Corpo de Prova) permite medir a deformação devido à força aplicada com muita precisão. E para o Engenheiro, a medição dessa mudança é muito importante, pois é a partir dela que se desenha a curva de tensão-deformação do material, como pode ser visto na figura 5. Mas, ao alcançar o ponto de tensão máxima que o material sustenta, a deformação uniforme encerra devido ao aparecimento de estricção, ou diminuição da seção do corpo de prova, em metais com boa ductibilidade. Geralmente a ruptura do material aparece na faixa estrita, ou em casos de rara eventualidade, ocorre em outra região devido a defeitos internos (SOUZA, 1982).

**Figura 5** - Curva tensão deformação



Fonte: GARCIA (1999).

A curva tensão-deformação apresenta uma região linear e a inclinação dessa região é definida como o módulo elástico ou o módulo de Young. O módulo de elasticidade é uma grandeza da rigidez de um material. Quanto maior esta grandeza, menor a deformação elástica ocasionada pela carga aplicada. Esta é uma variável importante porque é necessário resolver o cálculo da deflexão de vigas e outros componentes (MEYERS; CHAWLA, 1982).

Em vários componentes, a situação ideal é suportar uma tensão específica maior que da tensão de escoamento sem quebrar. A capacidade de um material de absorver energia em uma área plástica é definida como tenacidade. No estado plástico, os materiais são sujeitos a tensões onde as deformações são definitivas. Durante o teste de tração, diferentes materiais podem exibir comportamento semelhante. A curva de resultado do ensaio de tração é a curva de tensão x deformação de engenharia do material metálico, conforme mostrado na figura 5, na qual o comportamento antes da fratura é observado. (GODEFROID; CANDIDO, 2010).

### 3.18 SOLDABILIDADE

A propriedade soldabilidade está relacionada com a capacidade na união de materiais quando submetidos a processos de soldagem, garantindo a qualidade técnica da junta, resultando em uma junta devidamente satisfatória, sem que haja a necessidade de realizar qualquer tipo de procedimentos prévios, durante ou após à operação (NIEBLES; UNFRIED; TORRES, 2014).

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2005), esta característica é afetada em função dos efeitos da combinação entre diferentes tipos de elementos de liga e o carbono.

Quanto maior o teor de carbono equivalente presente no aço, facilitam o surgimento de trincas a frio, de modo a reduzir a qualidade da junta a ser soldada. Alguns fatores como a energia de soldagem envolvida no processo e a espessura da peça também devem ser analisados (GUIMARÃES; SILVA; SILVA, 2011).

Durante o processo de resfriamento da poça de fusão e após a fase de

solidificação do material, algumas modificações como as transformações de fase do metal de solda, a formação de alguns carbonetos e o aumento no tamanho de grão e podem ocorrer (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005; WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2005), características da Zona termicamente afetada (ZTA) estão associadas com o processo de soldagem. E material de base. Com isso, foi possível realizar relações entre o teor de carbono e soldabilidade, conforme quadro 2.

**Quadro 2** - Comparativo de soldabilidade x teor de carbono do aço.

Material	Soldabilidade			
	Ótima	Boa	Regular	Difícil
Aço de baixo carbono	X			
Aço de médio carbono		X	X	
Aço de alto carbono				X
Aço inox	X	X		
Aço liga			X	
Ferro fundido cinzento			X	
Ferro fundido maleável e nodular			X	
Ferro fundido branco				X
Ligas de alumínio		X		
Ligas de cobre		X		

Fonte: MARANHO (2013).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 MATERIAIS

O material utilizado para realização dos experimentos, de acordo com as especificações técnicas da norma ASTM, foi o aço A36 e A572 – grau 50. Através do ensaio de espectrometria, os elementos químicos presentes no material ensaiado foram apresentados conforme tabela 4.

**Tabela 4** - Composição química (em %) do aço ASTM A36 e A572

Aço	C	Mn	Si	Al	S	P	Ni	Nb
ASTM A36	máx 0,26	0,60 0,90	máx 0,40	máx 0,02	máx 0,05	máx 0,03	máx 0,01	-
ASTM A572	máx 0,23	0,80 1,35	máx 0,4	-	máx 0,05	máx 0,04	-	máx 0,002

Fonte: GERDAU (2018).

### 4.2 MÉTODOS

Os métodos explicitados abaixo foram realizados dentro de uma sequência lógica, de acordo com procedimentos pré-estabelecidos para a execução dos ensaios, tratamentos e análises pertinentes.

#### 4.2.1 Cronograma físico das atividades

Com base no cronograma informado no quadro 3, foi possível cumprir com a realização das tarefas, de acordo com suas programações.

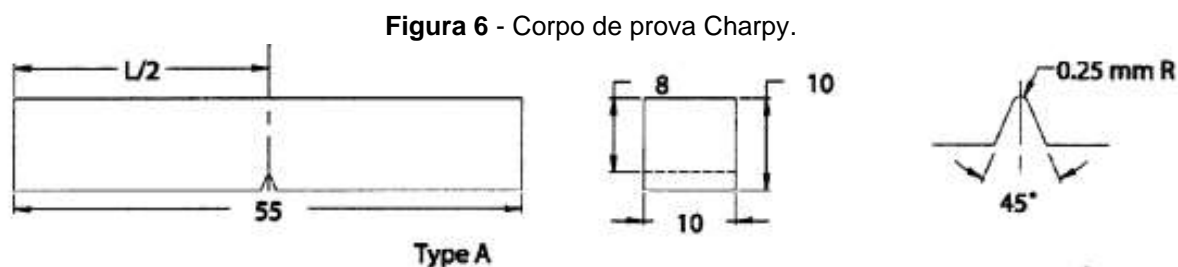
**Quadro 3** - Cronograma físico das atividades.

ATIVIDADES	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN
A - Preparação dos materiais;	■	■									
B - Confeção dos corpos de prova;	■	■									
C - Análise de Espectrometria;											
D - Análise Metalográfica;											
E - Análise de tração;			■								
F - Análise de Dureza;			■								
G - Análise de Charpy;			■								
H - Tratamento Térmico;				■	■	■	■	■			
I - Apresentação Colóquio;			■								
J - Revisão Bibliográfica TCC;		■	■	■							
K - Resultados e Conclusão TCC;						■	■	■	■	■	■
L - Entrega do TCC para Banca;										■	
M – Apresentação Final;											■
N - Correções e Entrega TCC Final.											■

Fonte: OS AUTORES (2020).

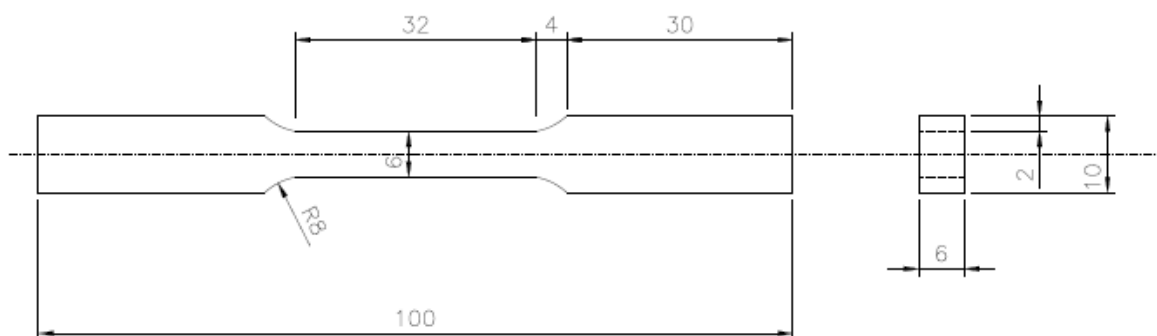
#### 4.2.2 Confeção dos corpos de provas

Os corpos de prova foram confeccionados baseado na norma ASTM E23 para o ensaio de Charpy. Na figura 6, mostra as dimensões do corpo de prova.



Fonte: NORMA ASTM E23

Do mesmo modo, que na figura 7, mostra as dimensões do corpo de prova de ensaio de tração conforme norma ASTM E8 – E8M.

**Figura 7 -** Corpos de prova tração.

Fonte: OS AUTORES (2020).

#### 4.2.3 Espectrometria

Dispostos dos aços ARBL e aço carbono manganês em estado inicial de conformação, foram confeccionados um corpo de prova de cada aço descrito acima num diâmetro de 50mm e espessura de 10mm para garantir uma melhor preparação da face a ser efetuada a análise química em ambos os aços e dispor de resultados mais confiáveis.

Após a preparação dos aços, com as lixas d'água de granulação de 200, 220, 320, 400, 600, 1000, 1200, foi posicionado inicialmente para análise no espectrômetro óptico, o corpo de prova do aço ASTM A36 conforme mostrado na figura 8.

**Figura 8 -** Corpo de prova para análise de espectrometria óptica do aço carbono ASTM A36.

Fonte: OS AUTORES (2020).

Na sequência, o aço ASTM A572, foi submetido ao mesmo processo preparatório para análise, visualizado na figura 9.

**Figura 9** - Corpo de prova para análise de espectrometria óptica do aço carbono ASTM A572 Gr 50.



Fonte: OS AUTORES (2020).

Após finalização do ensaio químico de espectrometria, com o auxílio computacional, foi possível dispor da composição química, conforme tabela 5, de cada aço em análise, configurado com seus principais elementos de liga presentes em sua conformação.

#### 4.2.4 Metalografia

Após a confecção dos corpos de prova, iniciou-se o ensaio de metalografia, de acordo com a sequência a seguir:

- Embutimento;
- Lixamento;
- Polimento
- Ataque químico;
- Análise óptica das amostras;

#### 4.2.4.1 Embutimento

O propósito do embutimento é de proteger os materiais frágeis ou revestidos durante a preparação, além de facilitar o manuseio da amostra. Para a realização deste, foi utilizada a técnica de embutimento a quente, conforme figura 10.

**Figura 10** - Embutidora metalográfica EM30D.



Fonte: OS AUTORES (2020).

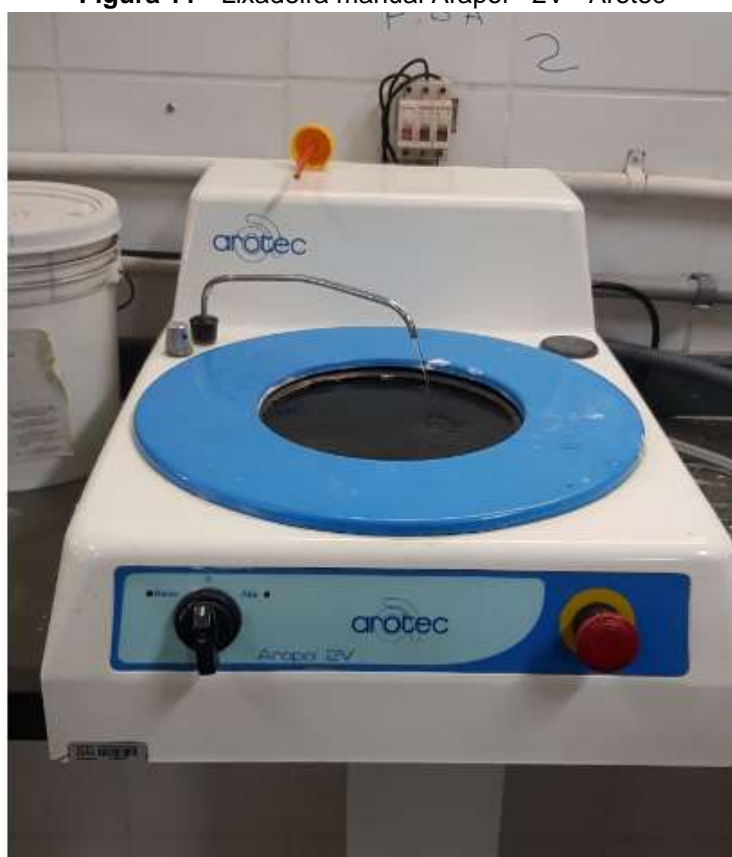
Inicia-se o processo aplicando desmoldante de silicone no recipiente da embutidora. O corpo de prova é posicionado de forma centralizada na máquina, em seguida adicionou-se uma medida de baquelite. Na sequência, é aplicada uma pressão, através de uma alavanca lateral que aciona um pistão hidráulico. Ao passo que a pressão interna decaía, uma alavanca era movimentada com o objetivo de

manter a pressão interna necessária para realizar o embutimento. Após um tempo de cinco minutos o embutimento está finalizado.

#### 4.2.4.2 Lixamento

Após o embutimento, obedecendo a granulometria correta, da lixa mais grossa para a mais fina, inicia-se o processo na lixadeira manual conforme figura 11.

**Figura 11** - Lixadeira manual Arapol - 2V - Arotec



Fonte: OS AUTORES (2020).

Com o auxílio das lixas de água 200, 220, 320, 400, 600, 1000, 1200, visto na figura 12, é possível efetuar correção das imperfeições mais rústicas, sempre tomando o cuidado para não arredondar a aresta do corpo de prova, até atingir uma superfície perfeitamente polida.

**Figura 12** - Lixa d'água.



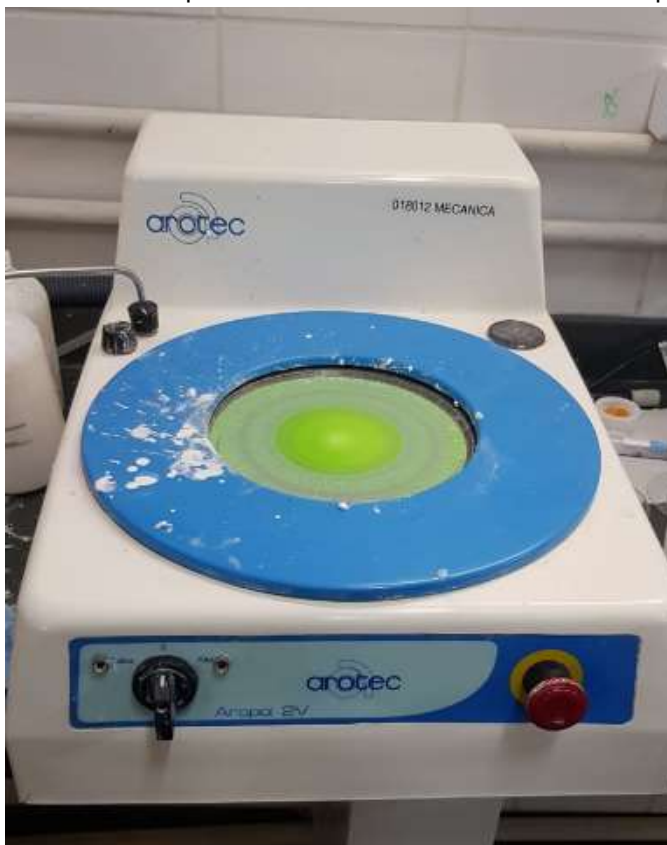
Fonte: OS AUTORES (2020).

Todos os processos de lixamento foram realizados com a utilização de água, sempre mantendo o esforço no centro da amostra para não criar planos.

#### 4.2.4.3 Polimento

Após o lixamento dos Corpos de Prova dos aços A36 e A572, colocou-se as amostras na Politriz com feltro de  $2\mu\text{m}$  e pasta de alumina com granulação mais fina para ter acabamento melhor, conforme figura 13, até a superfície da amostra atingir uma aparência espelhada e sem risco.

**Figura 13** - Polimento com pasta de alumina - lixadeira manual Arapol 2V Arotec.



Fonte: OS AUTORES (2020).

#### 4.2.4.4 Ataque químico

Após o polimento, as amostras foram submetidas ao ataque químico com a utilização do Nital, 3% de álcool etílico e 97% de ácido nítrico, na câmara para ataque químico conforme figura 14. Para possibilitar a revelação da microestrutura do material em análise, a amostra ficou exposta durante 25 segundos, retirada e submetida em água corrente, em seguida, direcionada para a visualização no microscópio óptico.

**Figura 14** - Câmara para ataque químico.



Fonte: OS AUTORES (2020).

#### 4.2.4.5 Análise óptica das amostras

A visualização da microestrutura dos aços em questão se fez pela utilização de um microscópio óptico Olympus U-SPT, conforme figura 15.

Após o preparo das amostras, estas foram posicionadas e submetidas a análises com ampliações de resoluções entre 100 X, 200 X, 400 X, 1000 X para posteriores análises computacionais.

**Figura 15** - Microscópio óptico Olympus U-SPT.



Fonte: OS AUTORES (2020).

#### **4.2.5 Ensaio de dureza**

As medidas de dureza foram coletadas através de um durômetro do tipo Rockwell, escala B, da marca Pantec, conforme figura 16. Foram extraídas 3 medições em cada uma das amostras obtendo-se no final a média aritmética.

**Figura 16** - Durômetro do tipo Rockwell Pantec.



Fonte: OS AUTORES (2020).

#### 4.2.6 Ensaio de tração

Utilizando-se o equipamento EMIC, conforme figura 17, os ensaios de tração foram realizados e, para isso, foram preparados 3 corpos de prova de cada aço, ARBL e aço carbono manganês, do material como recebido, com base na norma ASTM E8 – E8M, de acordo com a figura 19. Os CP's foram posicionados no equipamento de ensaio de tração e o ensaio propriamente dito se iniciou, gerando os gráficos conforme figuras 34 e 35 e tabelas 6 e 7. Após o ensaio de tração, os corpos de prova foram deformados conforme figuras 18 e 20.

**Figura 17** - Equipamento de ensaio de tração EMIC.



Fonte: OS AUTORES (2020).

**Figura 18** - Corpos de prova do aço ASTM A36 após ensaio de tração.



Fonte: OS AUTORES (2020).

**Figura 19** - Corpos de prova do aço ASTM A36 e aço ASTM A572 antes do ensaio de tração.



Fonte: OS AUTORES (2020).

**Figura 20** - Corpos de prova do material ASTM A572 após o ensaio de tração.



Fonte: OS AUTORES (2020).

#### 4.2.7 Ensaio de charpy

Os corpos de prova dos aços ARBL e aço carbono manganês foram confeccionados baseando-se pela norma ASTM E23a, como representado na figura 6. Em casa uma das amostras, foram realizadas três medições, onde obteve-se no final a média aritmética, valores informados na tabela 10.

As figuras 21 e 22, representam os corpos de prova deformados após a finalização do ensaio de Charpy.

**Figura 21** - Corpos de prova do material ASTM A36 após ensaio de charpy.



Fonte: OS AUTORES (2020).

**Figura 22** - Corpos de prova do material ASTM A572 após ensaio de charpy.



Fonte: OS AUTORES (2020).

Utilizando o equipamento para ensaio de impacto (Charpy e Izod), fabricante Pantec, conforme figura 23, o martelo foi posicionado e posteriormente solto para promover o impacto com a face oposta ao entalhe, de acordo com a figura 24, que absorve uma certa energia, caracterizando a tenacidade do material ensaiado, e, até a altura  $h_r$ , continua o seu trajeto. O valor dessa altura final indicado pelo equipamento de ensaio Charpy já calcula a quantidade resultante de energia absorvida pelo CP, em Joules.

**Figura 23** - Equipamento de ensaio de charpy Pantec PS 30.



Fonte: OS AUTORES (2020).

**Figura 24** - Corpo de prova posicionado no equipamento de ensaio de charpy Pantec PS30

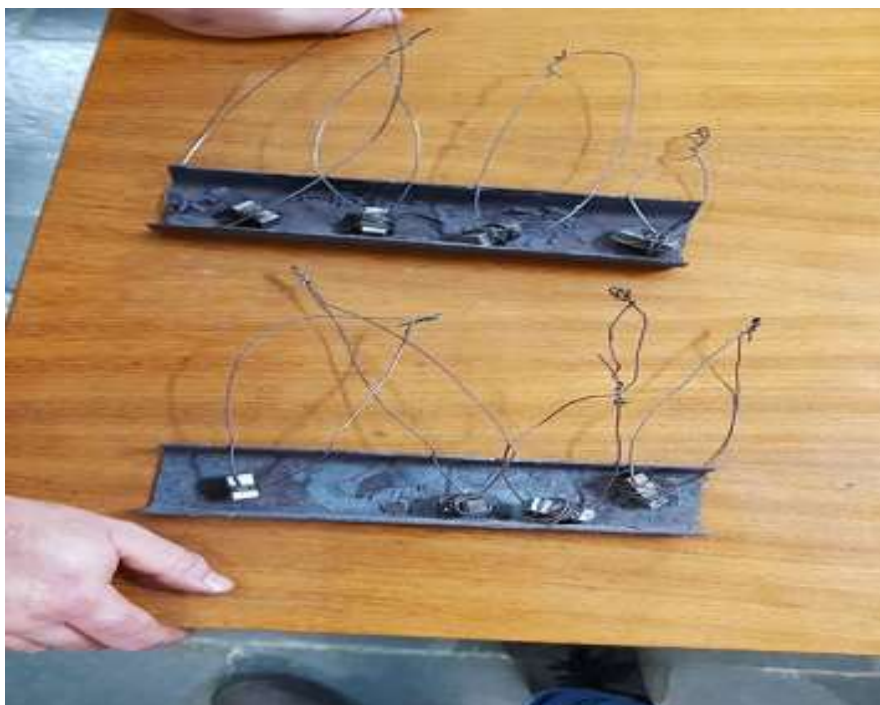


Fonte: OS AUTORES (2020).

#### 4.2.8 Tratamento térmico

Para a realização dos tratamentos térmicos, as amostras foram preparadas em tamanhos iguais de 10x10x27 mm cujo peso médio das amostras atingiram cerca de 21 g. Foram fixadas alças nos CP's, conforme figura 25 para facilitar o manuseio no momento da retirada da amostra do forno e posicionadas em um recipiente com cavacos de ferro fundido, de modo a evitar a descarbonetação. O Forno foi ligado e configurado com uma temperatura de 980 °C.

**Figura 25** - Preparação das amostras em recipiente para realização dos tratamentos térmico.



Fonte: OS AUTORES (2020).

As amostras dos aços ARBL e aço carbono manganês A36 foram adicionadas no forno, conforme figura 26 que já estava com a temperatura de 980°C em seu interior, e mantidas por um período de 30 minutos até garantir que toda a peça, da sua superfície ao núcleo, atinja esta temperatura.

**Figura 26** - Amostras posicionadas no forno.



Fonte: OS AUTORES (2020).

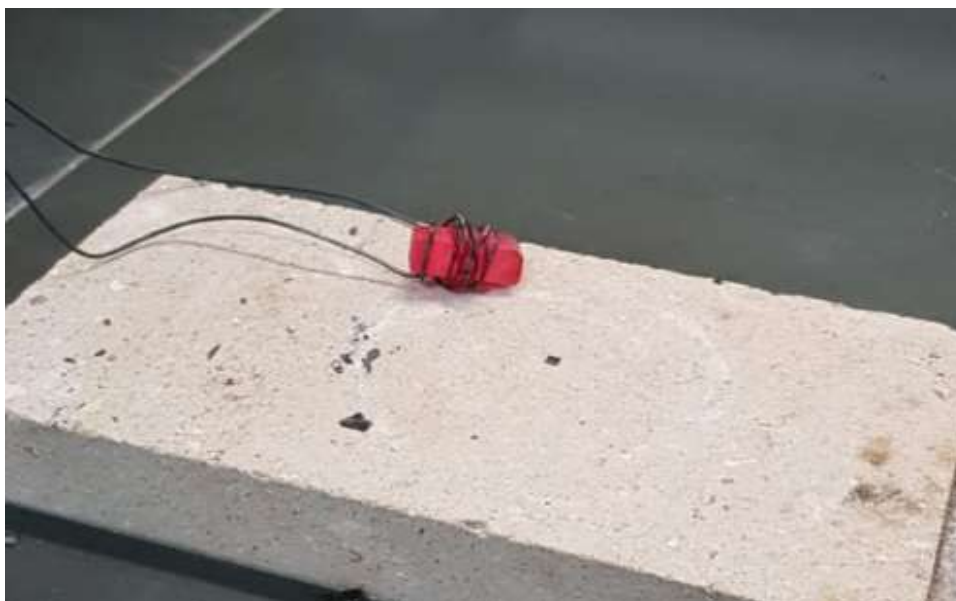
#### 4.2.8.1 Tratamento de recozimento

Para a realização do tratamento térmico de recozimento, após os procedimentos preliminares já expostos no item 4.2.8, o forno é desligado e a peça mantida no seu interior, deixando as amostras para resfriarem dentro do forno, até que seja atingida a temperatura ambiente.

#### 4.2.8.2 Tratamento de normalização

Para a realização do tratamento térmico de normalização, após os procedimentos preliminares já expostos no item 4.2.8, as amostras são retiradas do forno e posicionadas em um bloco refratário para resfriamento em temperatura ambiente, conforme figura 27.

**Figura 27** - Aço carbono ASTM A36 após retirada do forno refratário e posicionado para resfriamento



Fonte: OS AUTORES (2020).

#### 4.2.8.3 Tratamento de têmpera em óleo

Para a realização do tratamento térmico de têmpera em óleo, a amostra é retirada do forno e submersa em um recipiente com óleo para possibilitar uma taxa de resfriamento da peça relativamente melhor, conforme figura 28.

**Figura 28** - Amostra sendo submetida ao resfriamento em água (KTALO TN).



Fonte: OS AUTORES (2020).

#### 4.2.8.4 Tratamento de têmpera em água

Para a realização do tratamento térmico de têmpera em água, a peça é retirada do forno e submersa em um recipiente com água para possibilitar um aumento da taxa de resfriamento da amostra, conforme figura 29.

**Figura 29** - Amostra sendo submetida ao resfriamento em água.



Fonte: OS AUTORES (2020).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 ANÁLISE ESPECTROMÉTRICA DO MATERIAL COMO RECEBIDO

Após a aquisição dos aços ARBL e aço carbono manganês ASTM A36, foram confeccionados os corpos de prova conforme o padrão do equipamento que realiza o ensaio de espectrometria para possibilitar as análises quanto a composição química de cada aço, de modo a verificar a sua procedência.

Abaixo, é possível visualizar claramente através dos laudos disponibilizados pelo equipamento, a composição química dos aços, conforme tabela 5.

**Tabela 5** - Composição química segundo laudo do ensaio de espectrometria do aço ARBL e aço carbono manganês ASTM A36.

	C	Mn	p	S	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	Sn	V	Nb	B	Ti	Ca	N2	Als
<b>A36</b>	0,125	0,62	0,016	0,006	0,01	0,008	0,006	0,002	0,002	0	0,001	0	0,0001	0,001	0	0,006	0,042
<b>A572</b>	0,141	1,058	0,022	0,015	0,179	0,019	0,015	0,018	0,003	0	0,002	0,018	0,0001	0,001	0,0006	0,0074	0,002

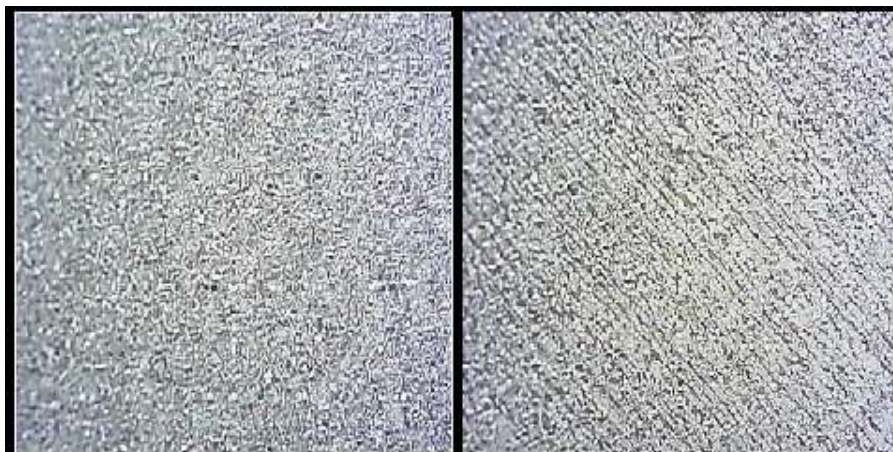
Fonte: OS AUTORES (2020).

É possível verificar pela análise de espectrometria de emissão óptica onde destaca-se uma maior presença do elemento Nióbio no aço ARBL, corroborando com os valores dispostos na norma, assim como os demais elementos químicos de ambos os aços. Mesmo que em escalas pequenas, a presença do elemento já justifica a característica no aço de maior resistência a corrosão e melhora das propriedades mecânicas do aço referido.

### 5.2 ANÁLISE METALOGRÁFICA DOS MATERIAIS RECEBIDOS

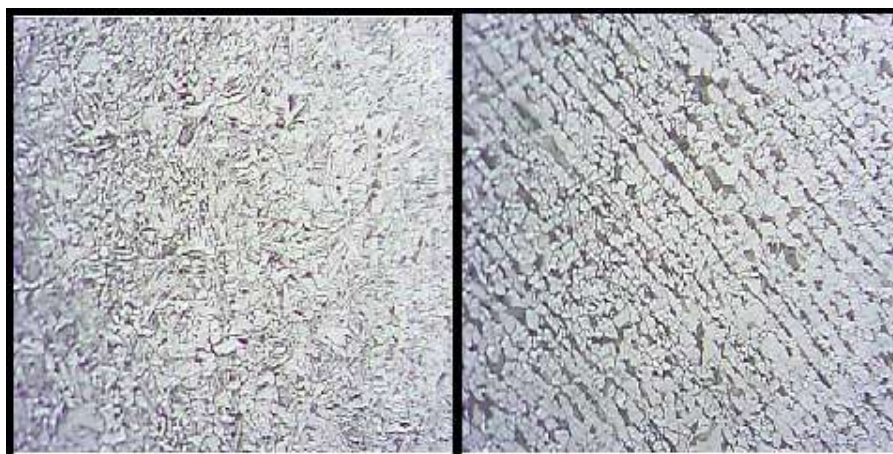
As microestruturas dos aços ARBL e aço carbono manganês ASTM A36, do material como recebido, foram geradas em um microscópio óptico Olympus U-SPT, com o auxílio de um computador que reproduziu as imagens, utilizando-se as lentes com ampliações de 100x, 200x, 400x e 1000x, conforme respectivas figuras 30, 31, 32 e 33.

**Figura 30** - Metalografia do aço carbono manganês e ARBL respectivamente com ampliação de 100X.



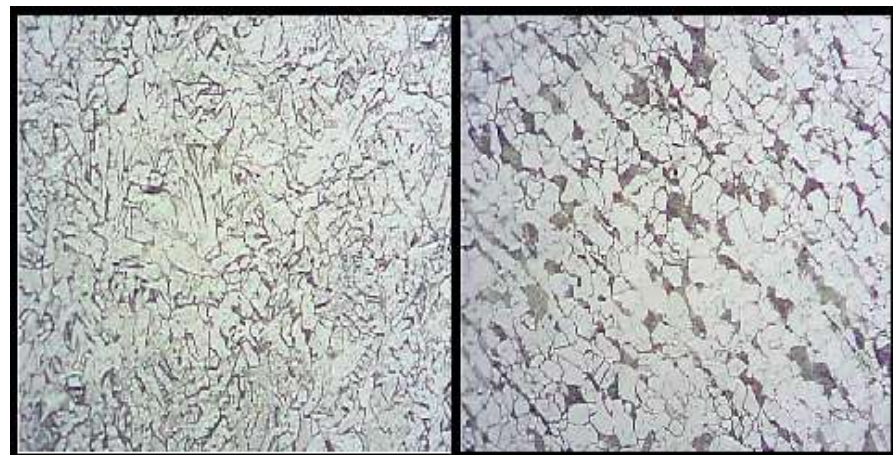
Fonte: OS AUTORES (2020).

**Figura 31** - Metalografia do aço carbono manganês e ARBL respectivamente com ampliação de 200X.



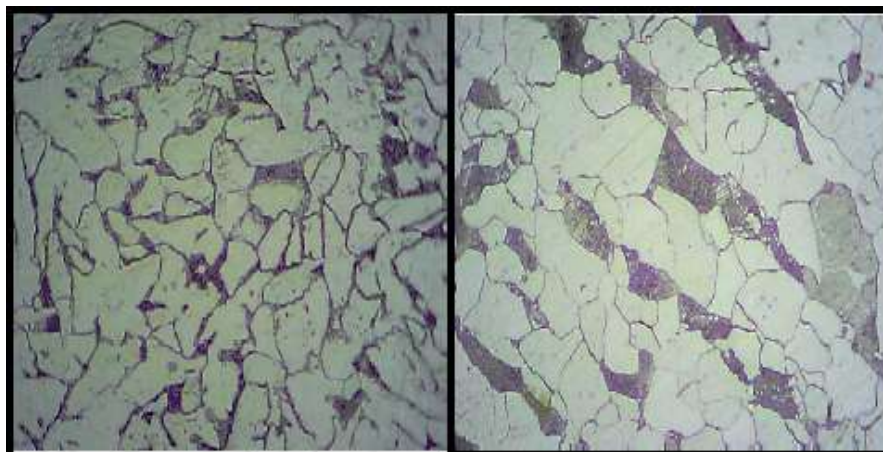
Fonte: OS AUTORES (2020).

**Figura 32** - Metalografia do aço carbono manganês e ARBL respectivamente com ampliação de 400X.



Fonte: OS AUTORES (2020).

**Figura 33** - Metalografia do aço carbono manganês e ARBL respectivamente com ampliação de 1000X.



Fonte: OS AUTORES (2020).

Com os dados obtidos pelo microscópio, é possível identificar que a microestrutura do aço ARBL se configura de forma mais organizada, possibilitando identificar com maior nitidez os grãos de ferrita e perlita em sua adjacente. Verifica-se que os grãos do aço carbono manganês ASTM A36 apresentaram uma definição e geometria menos clara e definida, características podendo ser em função da origem do processo de fabricação do material.

### 5.3 ENSAIO DE TRAÇÃO

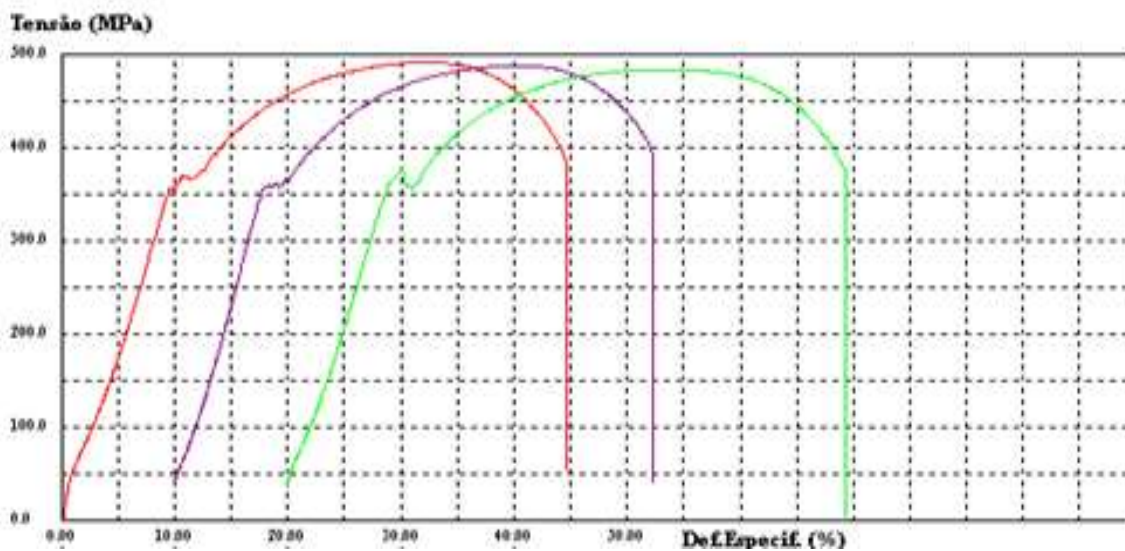
O ensaio de tração permitiu determinar comparativamente a resistência mecânica do aço ARBL e aço carbono manganês ASTM A36, através dos valores da tensão de escoamento, tensão máxima e tensão de ruptura. É possível analisar também a resiliência e tenacidade dos aços, através da área sob a reta da fase elástica e sob o gráfico (fase elástica e plástica), respectivamente. Podemos observar os resultados obtidos neste ensaio através das tabelas 6 e 7 e pelos gráficos representados nas figuras 34 e 35.

Tabela 6 - Resultados do ensaio de tração do aço ARBL.

Corpo de Prova	Compr. da Base (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Tensão de Escoam. (Mpa)	Tensão Força Max. (Mpa)
CP1	25	33,28	358,4	491
CP2	25	32,96	357	487
CP3	25	35,64	361	484
Número de CPs	3	3	3	3
Média	25	33,96	358,8	487,4
Mediana	25	33,28	358,8	487,5
Desvio Padrão	0	1,465	2,875	3,451
Coef. Variação	0	4,315	0,7874	0,708
Mínimo	25	32,96	356,8	483,9
Máximo	25	35,64	360,8	490,8

Fonte: OS AUTORES (2020).

Figura 34 - Gráfico tensão x deformação do aço ARBL.

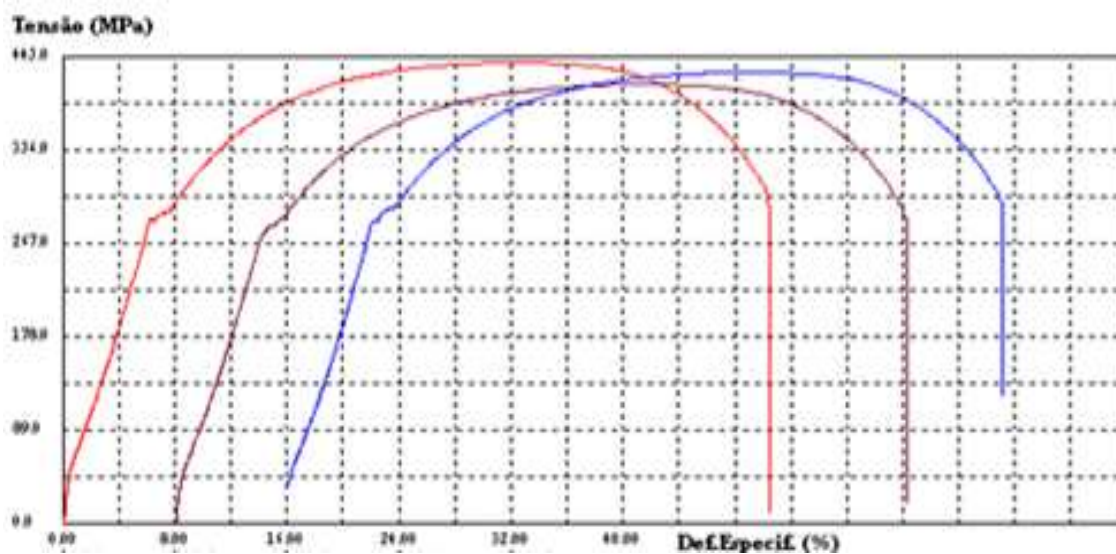


Fonte: OS AUTORES (2020).

**Tabela 7** - Resultados do ensaio de tração do aço carbono manganês

Corpo de Prova	Compr. da Base (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Tensão de Escoam (Mpa)	tensão Força Max (Mpa)
CP1	25	33,93	271	439
CP2	25	34,98	267	410
CP3	25	33,92	287	430
Número de CPs	3	3	3	3
Média	25	34,28	275	428,9
Mediana	25	33,93	271	429,9
Desvio Padrão	0	0,6097	8,64	10,22
Coef Variação	0	1,779	3,14	2,384
Mínimo	25	33,92	267,22	418,2
Máximo	25	34,98	287,1	438,5

Fonte: OS AUTORES (2020).

**Figura 35** - Gráfico tensão x deformação do aço carbono manganês

Fonte: OS AUTORES (2020).

Após a realização dos ensaios de tração descritos acima, obteve-se os valores de alongamento, limite de resistência e limite de ruptura, para determinar as características do material.

O alongamento representa a deformação que o corpo de prova sofre. O mesmo é dado pela equação 2:

$$AL = \left( \frac{Lf \times L0}{L0} \right) \times 100 \quad (2)$$

Onde:

$L_f$  - Comprimento final (mm);

$AL$  - Alongamento (%);

$L_0$  - Comprimento inicial (mm).

O limite de resistência corresponde à tensão máxima que o material ensaiado irá suportar sem se romper, onde pode ser calculado através da equação 3:

$$Lr = \frac{F_{max}}{S_0} \quad (3)$$

Onde:

$S_0$  - Área da seção inicial do corpo de prova.

$F_{max}$  - Carga máxima aplicada no material.

O limite de ruptura correspondente ao ponto de fratura do material. Quando o material é submetido a uma tensão máxima suportada, na sequência observa-se um decréscimo de carga aplicada, ou seja, o limite de ruptura é inferior ao limite de resistência, já que a área da seção do material sofre uma redução, denominado de estrição. Esta estrição pode ser calculada em função da redução percentual de área (RA%) dado pela equação 4:

$$RA\% = \left( \frac{A_0 - A_f}{A_0} \right) \times 100 \quad (4)$$

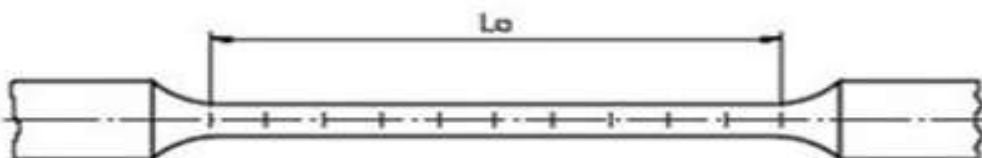
Onde:

$A_f$  - Área da seção transversal *final* do material (A36=12,6mm<sup>2</sup>; A572=14mm<sup>2</sup>).

$A_0$  - Área da seção transversal *inicial* do material

A figuras 36 demonstra características iniciais de um corpo de prova que se submeteu a um ensaio de tração.

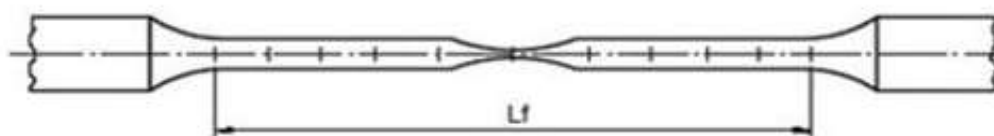
**Figura 36** - Corpo de prova antes do ensaio de tração.



Fonte: ASTM E8 – E8M.

A figura 37 demonstra características posteriores de um corpo de prova que se submeteu a um ensaio de tração, gerando um alongamento e a redução de sua área.

**Figura 37** - Corpo de prova após do ensaio de tração.



Fonte: ASTM E8 – E8M.

Com os valores encontrados através das equações (2), (3) e (4), foi possível observar alguns dados importantes relacionados aos materiais ensaiados, como pode se observar através da tabela 8.

**Tabela 8** - Valores do ensaio de tração do aço ARBL e aço carbono manganês.

CÉLULA DE CARGA - 100 KN											
Velocidade 3 mm/min											
	CP	LO (mm)	Largura (mm)	Média largura (mm)	Espessura inicial (e)	Média (e)	Lf (mm)	AL (%)	ALM (%)	LR (MPa)	RA (%)
Aço A36	1	25,0	5,8	5,8	5,9	5,9	34,4	37,4	38,9	482,9	63,3
			5,8		5,9						
			5,7		5,9						
Aço A36	2		5,8	5,8	6,0	6,0	34,9	39,4			
			5,8		6,0						
			5,9		6,0						
Aço A36	3		5,7	5,7	5,9	5,9	35,0	40,0			
			5,7		5,9						
			5,8		5,9						
Aço A572	1	5,5	5,5	6,1	6,1	32,9	32,4				
		5,5		6,1							
		5,5		6,0							
Aço A572	2	5,5	5,5	5,9	6,0	32,4	29,4				
		5,5		6,0							
		5,5		6,0							
Aço A572	3	6,0	6,0	5,9	6,0	34,2	31,8				
		6,0		5,9							
		6,0		5,9							

Fonte: OS AUTORES (2020).

Com base nos resultados obtidos com o ensaio de tração, observa-se uma resistência ao escoamento com o valor de 273 e 359 Mpa, e à ruptura de 429 e 487 Mpa para os aços A36 e A572 respectivamente. O maior alongamento do aço A36 em relação ao aço A572 corrobora com a maior ductilidade verificada no ensaio de Charpy, com valores de alongamento de 38,9 e 32,5 % para os aços A36 e A572 respectivamente.

#### 5.4 Ensaio de charpy

Com base nos resultados obtidos, ao submeter os corpos de prova de ambos ao ensaio de Charpy, de modo a analisar a propriedade tenacidade, que se resume a

capacidade de absorver energia até sua ruptura, verificamos os resultados conforme tabela 9.

**Tabela 9** - Comparativo dos valores de ductilidade através do ensaio de charpy dos aços ASTM A36 e A572.

PÊNDULO M 20 Kg			
Altura 790 mm			
	CP	Carga absorvida (J)	Carga absorvida média (J)
A36	1	124	120
	2	118	
	3	120	
A572	1	56	57
	2	60	
	3	47	

Fonte: OS AUTORES (2020).

O aço ASTM apresentou menor tenacidade em relação ao aço carbono manganês, ou seja, o aço ASTM A36 se deformou de forma muito mais nítida e clara, obtendo uma deformação de característica dúctil, onde os corpos de provas deformados nos ensaios permaneceram unidos, diferente do fenômeno visualizado no corpo de prova do aço ARBL, que se partiram totalmente e dividindo os CP's, possuindo uma característica de ruptura mais frágil.

Para encontrar a altura de rebote e velocidade de impacto foi utilizado o princípio da energia mecânica, demonstrado pelas equações (5), (6) e (7).

- Altura rebote Aço ASTM A36

$$\begin{aligned}
 EA &= Ei - Ef \\
 120J &= (m \cdot g \cdot h) - (m \cdot g \cdot hr) \\
 120J &= m \cdot g (h - hr) \\
 120J &= 20kg \cdot 10m/s^2 (0,790m - hr) \\
 hr &= 0,19m
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Onde:

$EA$  – Energia absorvida (J);

$Ei$  – Energia inicial (J);

$E_f$  – Energia final (J);  
 $m$  – Massa (Kg)  
 $g$  – Aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );  
 $h$  - Altura (m);  
 $hr$  – Altura de rebote (m).

- Altura rebote Aço ASTM A572

$$\begin{aligned}
 EA &= E_i - E_f \\
 57J &= (m \cdot g \cdot h) - (m \cdot g \cdot hr) \\
 57J &= m \cdot g (h - hr) \\
 57J &= 20kg \cdot 10m/s^2 (0,790m - hr) \\
 hr &= 0,505 m
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

- Velocidade de impacto Aço A36 e A572

$$\begin{aligned}
 EA &= E_i - E_f \\
 \frac{m \cdot V^2}{2} &= m \cdot g \cdot h \\
 V^2 &= 2 \cdot g \cdot h \\
 V &= \sqrt{(2 \cdot g \cdot h)} \\
 V &= 3,97 m/s
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Onde:

$V$  – Velocidade (m/s).

## 5.5 ENSAIO DE DUREZA DO MATERIAL COMO RECEBIDO

O ensaio de dureza Rockwell B permitiu mensurar para comparar os valores coletados de cada aço tabela 10.

**Tabela 10** - Valores de dureza HRB do aço ARBL e aço carbono manganês A36.

<b>ENSAIO DE DUREZA ROCKWELL B</b>			
<b>Carga de 100 Kgf</b>			
	<b>CP</b>	<b>Dureza</b>	<b>Média</b>
<b>Aço A36</b>	1	73	73
	2	73	
	3	73	
<b>Aço A572</b>	1	78	79
	2	79	
	3	80	

Fonte: OS AUTORES (2020).

No ensaio de dureza Rockwell realizado, comprovou-se que a semelhança da composição química e da microestrutura dos aços resulta em valores de Dureza obtidos aproximados, de 73 HRB e 80 HRB para os aços A36 e A572 respectivamente, o que pode estar associado por obterem valores similares em sua composição química, principalmente dos elementos carbono e manganês.

## 5.6 ANÁLISE COMPARATIVA DOS AÇOS APÓS TRATAMENTO TÉRMICO

Após a realização dos tratamentos térmicos, o aço ARBL e aço carbono manganês A36 foram submetidos a novas análises, metalográfica e de dureza, com o objetivo de comparar os resultados e as mudanças adquiridas.

### 5.6.1 Ensaio de dureza após tratamento térmico

No ensaio de dureza Rockwell efetuado, para cada amostra de cada tratamento térmico, verificou-se valores coerentes de cada aço conforme sua composição e tratamento térmico, explicitados na tabela 11.

**Tabela 11** - Comparativo dos valores coletados através do ensaio de dureza para os aços A36 e A572 tratados termicamente.

Ensaio de dureza Rockwell B					
	CP	Recozimento HRB	Normalização HRB	Tempera óleo HRB	Têmpera em água HRB
A36	1	52	66	80	85
	2	51	66	80	84
	3	51	67	80	84
A572	4	70	75	80	98
	5	71	74	82	97
	6	71	75	83	97

Fonte: OS AUTORES (2020).

Análise de resultados dos aços e seus respectivos tratamentos:

- Percebe-se que no ensaio de recozimento, tanto para o aço carbono manganês ASTM A36 quanto para o aço ARBL, apresentaram valores de dureza mais baixos em relação aos demais tratamentos térmicos, possivelmente em função do aumento do tamanho dos grãos e por consequência, aumento também da ductilidade do aço. Porém, ao comparar os valores da dureza das amostras, entre os dois aços, verifica-se um aumento desta propriedade ao aço A572.
- No ensaio de normalização, os comportamentos apresentados tanto nos Aço A36 quanto no aço A572, foram de valores intermediários de dureza, o que já era esperado. A diferença da dureza entre as amostras dos dois aços pode ocorrer em função da presença do elemento de liga nióbio que promove na matriz ferrítica um endurecimento por precipitação.
- Nota-se que após o ensaio de têmpera em óleo dos aços, os valores de dureza verificados são maiores em relação aos demais tratamentos. Isto ocorre devido a sua maior taxa de resfriamento, ainda que em óleo. Porém, a temperabilidade entre as amostras não foi muito diferente, visto que com estes valores não foi possível formar Martensita e, sequer bainita, de acordo com o gráfico demonstrado na figura 4.
- O aumento da taxa de resfriamento presente no ensaio de têmpera em água apresenta também o aumento da dureza das amostras. Porém, mesmo que ambos os aços tenham sido submetidos a um resfriamento mais brusco, os valores extraídos do ensaio de dureza Rockwell B evidenciam a não formação do microconstituente martensita ou até mesmo a bainita superior, de acordo com o gráfico da figura 4,

porém evidencia a maior da temperabilidade do aço ARBL em relação ao aço carbono manganês.

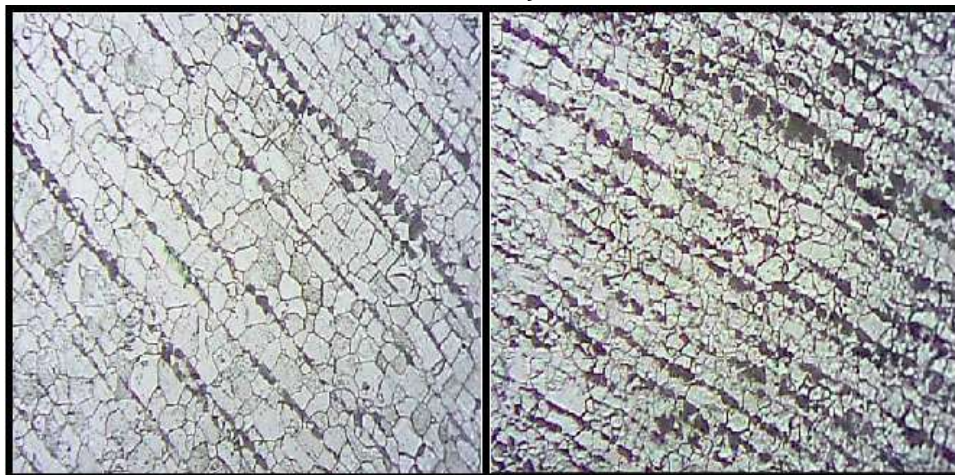
## 5.7 ANÁLISE COMPARATIVA DAS MICROESTRUTURAS APÓS TRATAMENTO TÉRMICO

Neste tópico foi possível encontrar, através da análise metalográfica dos aços ARBL e carbono manganês, submetidos a tratamentos térmicos, suas disposições microestruturais.

### 5.7.1 Reozimento

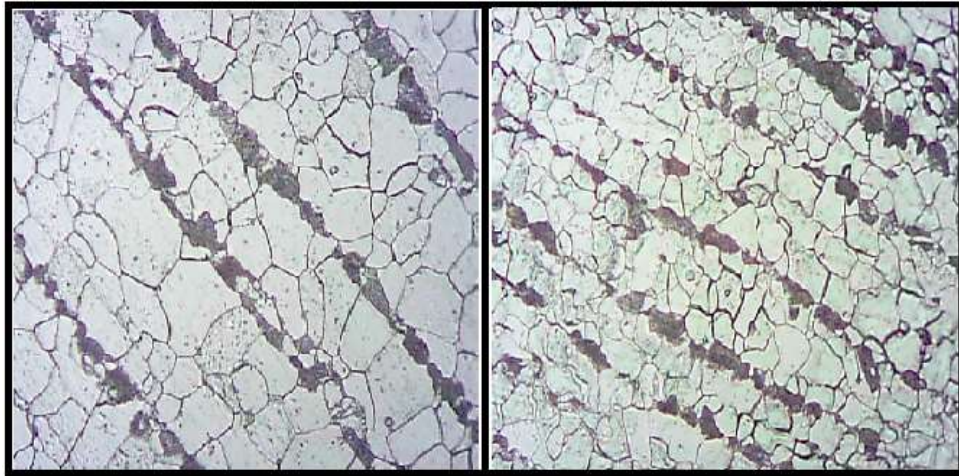
As figuras 38 e 39, representam a comparação dos materiais aço ARBL e aço carbono manganês, submetidos a tratamento térmico de recozimento. Com resoluções variando entre 200x e 400x.

**Figura 38** - Metalografia após o tratamento térmico de recozimento do aço carbono manganês e aço ARBL. Com resolução de 200x



Fonte: OS AUTORES (2020).

**Figura 39** - Metalografia após o tratamento térmico de recozimento do aço carbono manganês e aço ARBL. Com resolução de 400x



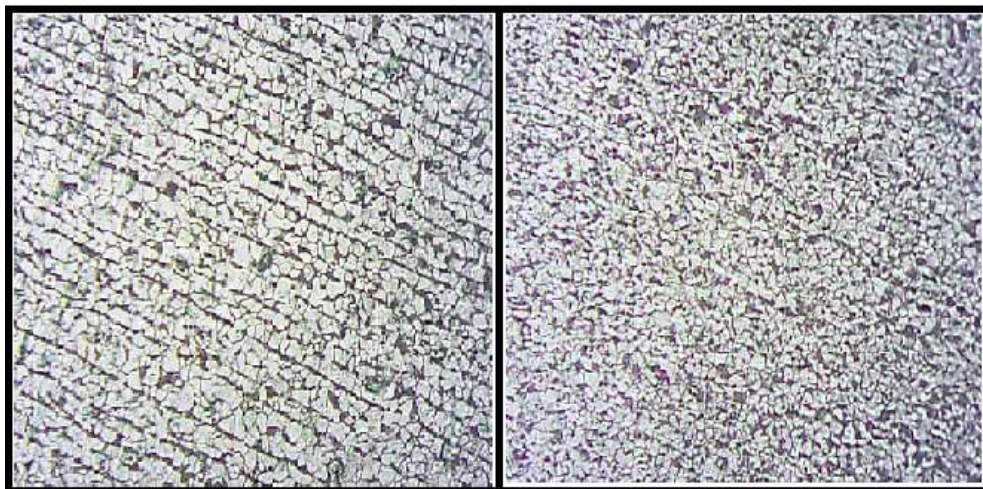
Fonte: OS AUTORES (2020).

Como é característico do resultado do tratamento térmico de Recozimento, neste caso percebe-se maiores dimensões do tamanho de grão, em função do maior tempo para resfriamento. Ocorre também por possuir, neste tratamento térmico, um maior tempo de exposição a uma alta temperatura, de modo que os grãos absorvam mais energia durante o resfriamento. Diferentemente da análise metalográfica das amostras do tratamento térmico de normalização, neste caso percebemos uma similar ordenação da microestrutura de ambas as amostras, inclusive da formação em linha da perlita.

### 5.7.2 Normalização

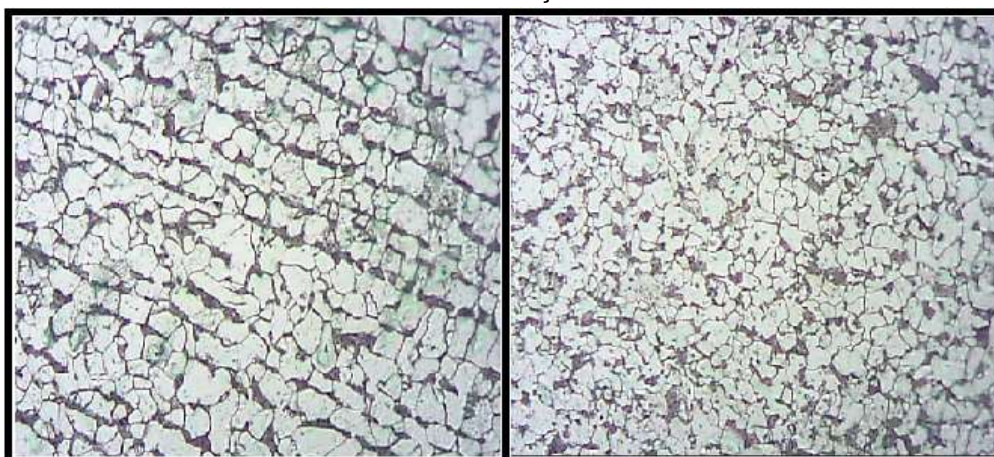
As figuras 40 e 41, representam a comparação dos materiais aço ARBL e aço carbono manganês, submetidos a tratamento térmico de normalização. Com resoluções variando entre 200x e 400x.

**Figura 40** - Metalografia após o tratamento térmico de normalização do aço carbono manganês e aço ARBL. Com resolução de 200x.



Fonte: OS AUTORES (2020).

**Figura 41** - Metalografia após o tratamento térmico de normalização do aço carbono manganês e aço ARBL. Com resolução de 400x.



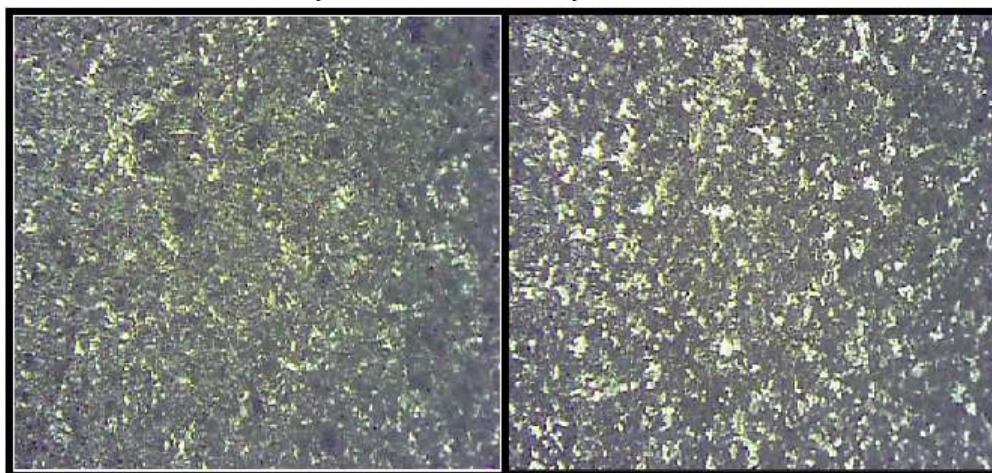
Fonte: OS AUTORES (2020).

Verifica-se neste caso que há uma diferença do tamanho de grão entre as amostras de cada aço. Este fenômeno pode ter ocorrido devido a presença do elemento nióbio, que promove na austenita o retardamento da sua recristalização, resultando na diminuição do tamanho de grão da ferrita. Ainda que com composição química e microestrutura similar, a dureza HRB das amostras apresentaram-se com valores distintos, possivelmente devido ao endurecimento por precipitação na matriz ferrítica promovido em função da adição do elemento nióbio no aço A572, conforme valores apresentados na tabela 11, e também em função da presença de um menor tamanho de grão da amostra do aço ARBL.

### 5.7.3 Têmpera em óleo

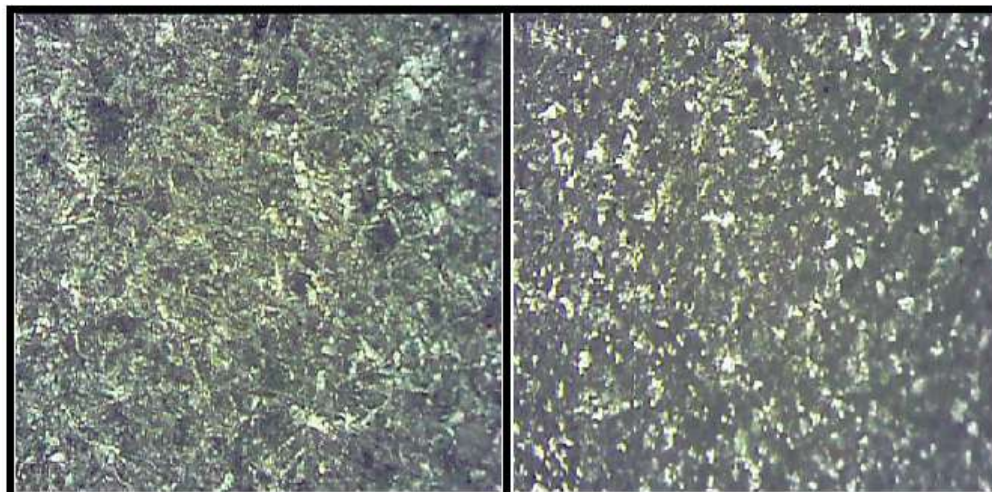
As figuras 42 e 43, representam a comparação dos materiais aço ARBL e aço Carbono manganês, submetidos a tratamento térmico de têmpera em óleo. Com resoluções variando entre 200x e 400x.

**Figura 42** - Metalografia após o tratamento térmico de têmpera em óleo do aço carbono manganês e aço ARBL. Com resolução de 200x



Fonte: OS AUTORES (2020).

**Figura 43** - Metalografia após o tratamento térmico de têmpera em óleo do aço carbono manganês e aço ARBL. Com resolução de 400x



Fonte: OS AUTORES (2020).

Mesmo que as amostras tenham sido submetidas ao tratamento térmico de têmpera em óleo, cujo a taxa de resfriamento é inferior, quando comparado ao tratamento de têmpera em água, os valores da dureza Rockwell verificados, de 80 e 82 HRB para os aços A36 e A572 respectivamente, conforme figura 4, comprovam

que não foi gerado o microconstituente martensita, cujo valor de dureza, para esse percentual de carbono seria algo em torno de 109 RHB, e nem mesmo possibilitou a formação da bainita superior, que possui dureza com valores de aproximadamente 105 RHB, mas sim a formação da perlita fina. Desta forma, a conclusão é de que ambas as amostras se classificam como aços com baixa temperabilidade.

## 6 CONCLUSÃO

Em suma, após a realização de ensaios mecânicos e tratamentos térmicos no aço ARBL A572 e aço carbono manganês, permitiram-se as seguintes conclusões:

Com base nos resultados coletados e obtidos através dos ensaios realizados neste trabalho, a conclusão é a de que a adição do elemento de liga nióbio participa de forma muito clara e evidencia algumas melhorias significativas no aço, a começar pelo aumento da resistência a tração, já que, quando comparado o aço ARBL com o aço carbono manganês, fica evidenciado pelos gráficos (tensão versus deformação) gerados, uma maior tensão de escoamento/ruptura presente.

Ainda que com uma pequena adição de nióbio, aliado ou não a um tratamento térmico, o aço liga adquire características cujo resultados são diferenciados, corroborando em melhores propriedades na liga e em sua resistência mecânica.

A energia absorvida pelo aço carbono manganês é significativamente maior, neste caso, explicado pela maior ductilidade que este material possui, resultando em uma maior tenacidade.

Mesmo quando o aço A572 foi submetido a uma alta taxa de resfriamento, quando em altas temperaturas, a formação do microconstituente martensita não foi verificado. Isso demonstra uma tendência favorável do aço no que diz respeito a sua soldabilidade, já que a aparição de microconstituintes indesejáveis durante o processo de solda seria minimizada, ainda que possua a presença de elementos (nióbio e manganês) desfavoráveis neste ponto de vista. Ainda, por este elemento de liga (Nióbio) conferir à liga a característica de retardamento da recristalização da austenita, a área da ZTA, cujo grãos tendem a crescer podem ser menos afetadas.

Quando se avalia esta mudança de característica no comportamento do aço associada à sua aplicação final, a justificativa do uso e da opção pela utilização do aço ARBL estudado se torna clara, por possuir uma redução de peso e, conseqüentemente, de custos, quando na aplicação em projetos de engenharia envolvendo fabricação de componentes mecânicos e de estruturas. É perceptível estes ganhos em diversas áreas até a aplicação final do aço, desde a sua fabricação onde se demandaria menos material e recursos, passando pelo transporte que demandará uma menor quantidade de movimentações de cargas necessárias e

consequentemente menor consumo de combustível. Já quando avaliamos a viabilidade para implantação de um projeto, a tendência é de que nesta fase se verifique uma potencial redução de custos em virtude do cálculo para implantação do projeto ser baseado em toneladas montadas bem como uma necessidade do projeto em obter uma menor fundação para suportar as cargas estruturais, já que estas seriam significativamente menores.

Todas as mudanças de característica visualizadas no aço são decorrentes da adição de valores muito menores de um elemento de liga, o nióbio, em relação ao percentual necessário para que outros elementos de liga como o manganês, cromo, carbono, por exemplo, caracterizando-o como um elemento microligante.

## REFERÊNCIAS

AMARAL, T. S. **Atlas microestrutural para otimização de procedimentos de soldagem**. 2016. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia.

ASKELAND, Donald R.; PHULÉ, Pradeep P. **The science and engineering of materials**. 4.ed. California: Brooks/Cole-Thomson Learning, 2003.

ASTM E-23 (2010): **Standart test methods for notched bar impact testing of metallic materials**.

ASTM E8/E8M-13: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **Standard Test Methods For Tension Testing of Metallic Materials**. West Conshohocken. ASTM. 2013

BEIDOKHTI, B.; DOLATI, A.; KOUKABI, A, H. (2009). **Effects of alloying elements and microstructure on the susceptibility of the welded HSLA steel to hydrogen-induced cracking and sulfide stress cracking**. *Materials Science and Engineering: A*. 507: 167-173.

CALLISTER JR, W.D. (2008). **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 7ª ed. Rio de Janeiro. LTC Editora. 705 p.

CALLISTER, Jr., William D., 1940 – **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: uma Abordagem Integrada**; tradução Sérgio Murilo Stamile Soares; Revisão técnica Paulo Emílio Valadão de Miranda – 2ª Edição - Rio de Janeiro: LTC, 2011.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 2012.

CHIAVERINI, V. **Tratamentos térmicos das ligas metálicas**. São Paulo: ABM, 2003.

CHIAVERINI, V. **Tratamentos Térmicos das Ligas Metálicas**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais ABM, 2008.

CHIAVERINI, Vicente. (1996) **Processos de fabricação e tratamento**. 2ª. ed, São Paulo.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Blücher, 2008. 262p.

DIAS, Luis Andrade de Mattos. **Edificações de Aço no Brasil**. São Paulo: Zigurate, 1999.

DNPM. **Departamento Nacional de Produção Mineral. Nióbio**. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriaDocumento/SumarioMineral2008/niobio.pdf>>  
Acesso em: 24 jan. 2020.

DOÑU RUIZ, M. A.; HERRARA, J. A. O.; PERRUSQUIA, N. L.; V, J. C.; CRUZ, L. D. R.(2012). **Effect of Aging Treatment in Micro - Alloyed STEEL**. imrs p Proceedins. 1481: 55-61.

ELWAZRI, A. M., VARANO, R., SICILIANO, F., BAI, D., YUE, S. (2005). **Effect OF Cool Deformation on mechanical Properties of a High-Stenght Pipeline Steel**. Metallurgical and materiais Transaction A,36: 2929-2936.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime A; SANTOS, Carlos A; **Ensaio de Materiais**. 2.ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2012.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alares; SANTOS, Carlos Alexandre dos; (2012) **Ensaio dos Materiais** 2ª edição campinas, Editora LTC 365p.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaio dos materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 1999.

GERDAU – Gerdau S.A., **Perfis estruturais Gerdau**. Disponível em: <<https://www.gerdau.com/br/pt/produtos/perfis-estruturais-gerdau#adimage-0>>. Acesso em: 16 de abril de 2020.

GERDAU. **Perfis estruturais gerdau - Tabela de bitolas**. Disponível em: <<https://www.gerdau.com/br/pt/productsservices/products/Document%20Gallery/perfil-estrutural-tabela-de-bitolas.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2020.

GLADMAN, T. (1997) **The Physical Metallurgy of Microalloyed Steels**. Maney For Institute of Materials. 363p.

GODEFROID, L.B.; CANDIDO, L.C.; MORAIS, W.A.; **Análise de Falhas - Curso**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, Cubatão, 2010.

GORNI, A. A.; MEI, P. R. **Austenite transformation and age hardening of HSLA - 80 and ULCB steels**. Journal of Materials Processing Technology, Cubatão, v.155-156, p.1513- 1518, 2004.

GORNI, A.A. **Engenharia microestrutural das chapas de aços avançados de alta resistência**. In: Conferência Nacional de Conformação De Chapas, 11, 2008, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: Centro Brasileiro de Inovação em Conformação Mecânica, 2008, p.1-15.

GRIFFITH, W.P. e MORRIS, P.J.T. Charles Hatchett FRS (1765- 1847), **Chemist and discoverer of niobium**. Notes & Records of the Royal Society, v. 57, p. 299-316, 2003.

GUIMARAES, Gabriel Corrêa; SILVA, Ramsés Ferreira da; SILVA, Luiz Carlos da. **Soldabilidade de aços resistentes à abrasão da classe de 450 HB de dureza**. Soldagem e Inspeção, v.16, n.4, p. 360-368, dez. 2011.

HATCH, group Apud; **Building Solutions that ignite your vision**. Disponível em: <<http://www.hatch.ca>>. Acesso em: 13 jan. 2005.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 7ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

ICHIKAWA, K. FUJIOKA, M. UEMORI, R. YOSHIE, A. **Progress in Thermomechanical Control Process Steel Plates**. **International Symposium on the Recent Developments in Plate Steels**, AIST, 2011.

INFOMET. **Recapitulação dos efeitos dos elementos de liga nos aços**. Disponível em: <https://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=12>>. Acesso em: 10 mar. 2020.

ITMAN, A., CARDOSO, K, R, (1997). **Quantitative Study of carbonitride Precipitation in Niobium and Titanium Microalloyed Hot Strip Steel**. *Materiais Science and Technology*. 13:49-55.

KAISER, J. A. Excerpt from 2015-2: Feb-Mar Review – **Scandium Intl. & Niocorp**. Kaiser Research Online, 2015.

KUNDU, A., DAVIS., STRANGWOOD, M. (2011). **Grain Size distributions after Single Hit deformation of a Segregates**, *Commercial Nb-containing Steel: Prediction and Experiment metallurgical and Materiais Transactions A*, 42A: 2794-2806.

KUSHIDA CA, BRADLEY E, GUILLEMINAULT C. **A predictive morphometric model for obstructive sleep apnea syndrome**. *Ann Intern Med* 1997; 127. (8):581-7.

LAWRENCE, M. Krauss (2000). **The Physies of Star Trek, With a Foreword by Stephen Hawking**, 1995, Paperback: New York; Harper, 2000.

LUZ, Gelson. **Aço SAE 1020 Propriedades Mecânicas e Composição Química**. Blog Materiais, [s. l], 2017. Disponível em: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-1020-propriedades-mecanicas.html>>. Acesso em: 18 fev. 2020.

MARANHO, Diego Araujo. **Avaliação de juntas soldadas em tubos de aço carbono submetidos a altas temperatura e pressões**. 2013. 71f. Dissertação (Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. Belo Horizonte: UFMG, 2005.

MEESTESER, B. **The Weldability of Modern Structural TMCP Steels**. *ISIJ International*, v. 37, p. 537 – 551, 1997.

MEYERS M.A., CHAWLA, K.K. 1982. **“Princípios de Metalurgia Mecânica”**. Ed. Edgard Elücher, S.Paulo, SOSp.

METALFITAS, **Tabela de Conversão de Dureza**. Disponível em: <https://metalfitas.com.br/pdf/tabela-de-conversao-de-dureza.pdf>>. Acesso em: 20 maio. 2020.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto B. **Introdução à metalurgia da soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, 2012.

NICODEMI, W. (2010). **Acciao e leghe non ferrose**. Itália. Zanichelli. 339 p.

NIEBLES, Enrique E; UNFRIED, Jimy; TORRES, Jaime E. **Metodologias para el estudio de soldabilidad en uniones soldadas**. Información tecnológica, v.25, n.1, p. 03-14, 2014.

PATROCÍNIO, B. A. **Determinação de velocidades críticas de têmpera em aços por meio de curvas de resfriamento**. São Carlos – SP: Universidade de São Paulo, 1999, 117 p. Dissertação (Mestrado).

RO, K. S. (2000). **Improvement Of The Sulfide Stress Corrosion Cracking Properties Of Hot Roiled Line-Pipe Steels**. Corrosion 2000. 1-12.

SILVESTRE, L. et al. **High Strength Steel as a Solution for the Lean Design of Industrial Buildings**. *jmr&t Journal of Materials Research and Technology*, p. 35 – 41, 2014.

SOUZA, A, S. **Composição química dos aços**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda. 1989. 134p.

SOUZA, Sérgio Augusto de, (1982). **Ensaio mecânicos de Materiais Metálicos – Fundamentos teóricos e Práticos**, 5ª edição São Paulo, Editora Edgard Blücher 286p.

TISZA, M. (2002). **Physical Metallurgy for Engineers**. ASM International. 402p.

VAN VLACK, L. H., **Princípio de Ciência e Tecnologia dos Materiais**, 4ª. ed. Rio de Janeiro, Campus, 1984.

VICENTE CHAVERINI, "Aços e Ferros Fundidos", **Características gerais, tratamentos térmicos e principais tipos**, 4 Edição São Paulo, Associação Brasileira de Metais 1977.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt. **Homem de Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: E. Blücher, 1992.

## ANEXOS

## ANEXO A - Efeitos específicos dos elementos de liga nos aços.

Elemento	Solubilidade sólida		Influência sobre a ferrita	Influência sobre a austenita (Endurecibilidade)	Influência exercida através dos carbonetos		Principais funções
	No ferro gama	No ferro alfa			Tendência formadora de carbonetos	Ação durante o revenido	
<b>Al</b>	1,1% (aumentada pelo C)	36%	Endurece consideravelmente por solução sólida	Aumenta a endurecibilidade moderadamente se dissolvido na austenita	Negativa (grafitiza)	-	1- Desoxidante eficiente 2- Restringe o crescimento de grão (pela formação de óxidos ou nitretos dispersos) 3- Elemento de liga nos aços para nitretação 1- Aumenta a resistência à corrosão e à oxidação 2- Aumenta a endurecibilidade 3- Melhora a resistência a altas temperaturas 4- Resiste ao desgaste (com alto C)
<b>Cr</b>	12,8% (20% com 0,5% C)	Sem limites	Endurece ligeiramente; aumenta a resistência à corrosão	Aumenta a endurecibilidade moderadamente	Maior que o Mn, Menor que o W	Moderada; Resiste à diminuição de dureza	1- Contribui à dureza a quente pelo endurecimento da ferrita 1- Contrabalaça a fragilidade devida ao S 2- Aumenta a endurecibilidade economicamente 1- Eleva a temperatura de crescimento de grão da austenita 2- Produz maior profundidade de endurecimento 3- Contrabalaça a tendência à fragilidade de revenido 4- Eleva a dureza a quente, a resistência a quente e a fluência 5- Melhora a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis 6- Forma partículas resistentes à abrasão
<b>Co</b>	Sem limites	75%	Endurece consideravelmente por solução sólida	Diminui a endurecibilidade no estado dissolvido	Semelhante ao Fe	Sustenta dureza pela solução sólida	
<b>Mn</b>	Sem limites	3%	Endurece acentuadamente - reduz um tanto a plasticidade	Aumenta e endurecibilidade moderadamente	Maior que o Fe, Menor que o Cr	Muito pequena nos teores normais	
<b>Mo</b>	3% (8% com 0,3% C)	37,5%	Produz o sistema endurecível por precipitação nas ligas Fe-Mo	Aumenta a endurecibilidade fortemente (Mo>Cr)	Forte; maior que o Cr	Opõe-se à diminuição de dureza criando a dureza secundária	

## ANEXO A - Efeitos específicos dos elementos de liga nos aços.

Elemento	Solubilidade sólida		Influência sobre a ferrita	Influência sobre a austenita (Endurecibilidade)	Influência exercida através dos carbonetos		Principais funções
	No ferro gama	No ferro alfa			Tendência formadora de carbonetos	Ação durante o revenido	
<b>Ni</b>	Sem limites	10% (sem relação com o teor do carbono)	Aumenta a resistência e a tenacidade por solução sólida	Aumenta a endurecibilidade ligeiramente; mas tende a reter a austenita com C mais elevado	Negativa (grafitiza)	Muito pequena em teores baixos	<p>1- Aumenta a resistência de aços recozidos</p> <p>2- Aumenta a tenacidade de aços ferríticos-perlíticos (sobretudo a baixas temperaturas)</p> <p>3- Torna austeníticas ligas Fe-Cr altas em Cr</p>
<b>P</b>	0,5%	2,8% (sem relação com o teor do carbono)	Endurece fortemente por solução sólida	Aumenta a endurecibilidade	Nenhuma	-	<p>1- Aumenta a resist-ência de aços de baixo C</p> <p>2- Aumenta a resistência à corrosão</p> <p>3- Aumenta a usinabilidade em aços de usinagem fácil</p>
<b>Si</b>	2% (9% com 0,35% C)	18,5% (não muito alterada pelo C)	Endurece com perda de plasticidade (Mn<Si<P)	Aumenta a endurecibilidade moderadamente	Negativa (grafitiza)	Sustenta a dureza por solução sólida	<p>1- Desoxidante</p> <p>2- Elemento de liga para chapas elétricas e magnéticas</p> <p>3- Aumenta a resistência à oxidação</p> <p>4- Aumenta a endurecibilidade de aços contendo elementos não grafitizantes</p> <p>5- Aumenta a resistência de aços de baixo teor em liga</p>
<b>Ti</b>	0,75% (1% com 0,20% C)	6%	Produz sistema endurecível por precipitação em ligas Ti-Fe com alto Ti	Provavelmente aumenta muito a endurecibilidade no estado dissolvido. Os efeitos de carbonetos reduzem-na.	A maior conhecida	Carbonetos persistentes provavelmente não afetados. Alguns endurecimento secundário	<p>1- Reduz a dureza martensítica e a endurecibilidade em aços ao Cr de médio Cr</p> <p>2- Impede a formação de austenita em aços de alto Cr</p>

## ANEXO A - Efeitos específicos dos elementos de liga nos aços.

Elemento	Solubilidade sólida		Influência sobre a ferrita	Influência sobre a austenita (Endurecibilidade)	Influência exercida através dos carbonetos		Principais funções
	No ferro gama	No ferro alfa			Tendência formadora de carbonetos	Ação durante o revenido	
<b>W</b>	6% (11% com 0,25% C)	33%	Idem em ligas W-Fe com alto W	Aumenta a endurecibilidade fortemente em pequenos teores	Forte	Opõe-se à diminuição de dureza por endurecimento secundário	1- Forma partículas duras e resistentes ao desgaste em aços-ferramenta 2- Promove dureza e resistência a altas temperaturas
<b>V</b>	1% (4% com 0,20% C)	Sem limites	Endurece moderadamente por solução sólida	Aumenta muito fortemente a endurecibilidade do estado dissolvido	Muito forte (V<Ti ou Cb)	Máxima para endurecimento secundário	1- Eleva a temperatura de crescimento de grão da austenita (promove refino do grão) 2- Aumenta a endurecibilidade (quando dissolvido) 3- Resiste ao revenido e causa acentuado endurecimento secundário
<b>Nb</b>			Endurecimento por Precipitação na Matriz Ferrítica e Redução do Tamanho do Grão Ferrítico	Retardo da Recristalização da Austenita			Aumento da Resistência à Corrosão  Aumento da Resistência
<b>Si</b>							Redução da Ductilidade