

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

**JOÃO RICARDO CRUZ MARINHO**

**SOLDAGEM MAG DO AÇO SAE 4340: ANÁLISE DA MICRODUREZA**  
**APÓS TRATAMENTO CRIOGÊNICO PROFUNDO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PONTA GROSSA**

**2019**

**JOÃO RICARDO CRUZ MARINHO**

**SOLDAGEM MAG DO AÇO SAE 4340: ANÁLISE DA MICRODUREZA  
APÓS TRATAMENTO CRIOGÊNICO PROFUNDO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, em engenharia mecânica, do Departamento Acadêmico de mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Roger Navarro Verastegui

**PONTA GROSSA**

**2019**



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

SOLDAGEM MAG DO AÇO SAE 4340: ANÁLISE DA MICROESTRUTURA APÓS  
TRATAMENTO CRIOGÊNICO PROFUNDO

por

JOÃO RICARDO CRUZ MARINHO

Este Trabalho de Curso foi apresentado em 5 de dezembro de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Roger Navarro Verastegui  
Orientador

Prof. Dr. Oscar Regis Junior  
Membro Titular

Prof. Dr. Denilson José Marcolino de Aguiar  
Membro Titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares  
Responsável pelos TCC

Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de  
Carvalho  
Coordenador do Curso

Dedico este trabalho à minha família, por acreditar na minha capacidade e à minha noiva Amanda, pela parceria e atenção em todos os momentos.

## **AGRADECIMENTOS**

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Roger Navarro Verastegui, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Aos meus pais e irmão e sempre me apoiaram e acreditaram que esse sonho seria possível.

A todos os professores que fizeram parte da minha trajetória, desde o ensino fundamental até o término do ensino superior.

A minha noiva Amanda que sempre esteve comigo na reta final e me deu muito amor e carinho.

A Secretaria do Curso, pela cooperação.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento aos meus amigos, pois acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

O entusiasmo é a maior força da alma.  
Conserva-o e nunca te faltará poder para  
conseguires o que desejas (HILL,  
Napoleon)

## RESUMO

MARINHO, João R. C. **Soldagem mag do aço sae 4340: análise da microdureza após tratamento térmico profundo.** 2019. 34 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019.

A busca por novos métodos e aplicabilidades para os materiais traz consigo a necessidade de melhorias e estudos sobre as propriedades mecânicas dos aços. O tratamento criogênico faz-se uma alternativa para os tratamentos térmicos convencionais, embora seja uma área de estudo relativamente nova. A bibliografia evidencia que a criogenia pode ser benéfica em diversas propriedades mecânicas, tais como resistência à fadiga, aumento da vida útil de componentes metálicos, incremento de dureza, entre outras vantagens. O presente trabalho tem como objetivo o estudo e análise da influência do tratamento criogênico na liga de aço SAE 4340 soldada com processo MAG com arame E70S-6, através da aplicação de micro cargas *Vickers* e do ensaio de impacto, utilizando três diferentes tempos de imersão em nitrogênio líquido (sem imersão, 2 horas e 4 horas). Os procedimentos apresentaram um leve aumento na dureza e uma diminuição da resistência ao impacto, que o tempo do tratamento apesar de curto transformou parte da austenita retida em martensita.

**Palavras-chave:** Micro cargas. Tratamento Criogênico. Ligas Metálicas. SAE 4340. Tratamento térmico.

## ABSTRACT

MARINHO, João R. C. **Influence of cryogenic treatment after SAE 4340 MAG welding**. 2019. 34 p. Work of Conclusion Course (Graduation in mechanical Engineering) - Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2019.

The search for new methods and applicability for the materials behind with it the need for improvements and studies on the mechanical properties of steels. Cryogenic treatment is an alternative for conventional heat treatments, although it is a relatively new area of study. Bibliography shows that cryogenic can be beneficial in several mechanical properties, such as fatigue resistance, increased shelf life of metal components, increased hardness, among other advantages. The present work aims to study and analyze the influence of cryogenic treatment on the SAE 4340 steel alloy welded with MAG process with E70S-6 wire, through Vickers microhardness and impact assay, using three different immersion times in liquid nitrogen (without immersion, 2 hours and 4 hours). The procedures showed a slight increase in hardness and a decrease in impact resistance, indicating that the treatment time despite short transformed part of the austenite retained into martensite.

**Keywords:** Microhardness. Cryogenic treatment. Metallic alloys. SAE 4340. Heat treatment.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva de resfriamento contínuo de um aço SAE 4340, com curvas de resfriamento superpostas, indicando as várias microestruturas que podem ser obtidas.....	13
Figura 2 - Componentes para soldagem MAG.....	15
Figura 3 - Influência do teor de carbono na dureza, resistência à tração e ductilidade.	18
Figura 4 - Esquema sequencial de pontos ensaiados.....	22
Figura 5 - Visão macro dos pontos ensaiados.....	22
Figura 6 - Gráfico das micro cargas nas amostras não tratadas.....	24
Figura 7 - Gráfico da micro cargas nas amostras com 2 horas de tratamento.....	25
Figura 8 - Gráfico da micro cargas nas amostras com 4 horas de tratamento.....	26
Figura 9 - Gráfico comparativo da dureza das amostras ensaiadas.....	27
Figura 10 - Gráfico da energia absorvida pelas amostras.....	29
Figura 11 - Aspectos da fratura no material ensaiado.....	30

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>12</b>
2.1 AÇOS.....	12
2.2 CLASSIFICAÇÃO MICROESTRUTURAL DOS AÇOS.....	12
2.3 AÇO SAE 4340.....	12
2.4 SOLDAGEM MAG.....	15
2.5 SOLDAGEM MAG DO AÇO SAE 4340.....	16
2.6 TRATAMENTO TÉRMICO DE PRODUTOS SOLDADOS.....	16
2.7 TRATAMENTO CRIOGÊNICO.....	17
2.8 PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	17
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>19</b>
3.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	19
3.2 SOLDAGEM.....	20
3.3 TRATAMENTO CRIOGÊNICO.....	20
3.4 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA ENSAIO DE DUREZA COM MICRO CARGAS E IMPACTO.....	21
3.5 ENSAIO DE MICRO CARGAS.....	22
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>23</b>
4.1 ENSAIO DE MICRO CARGAS.....	23
4.2 ENSAIO DE IMPACTO.....	28
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>31</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>32</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Desde a antiguidade, emprega-se tratamentos térmicos em ligas metálicas, sempre visando o aumento das propriedades mecânicas para atender as mais diversas solicitações. Embora o emprego dessas técnicas seja antigo, outras vertentes têm surgido no decorrer dos anos. Através de pesquisas, o melhoramento dos materiais metálicos, adicionando-se elementos de ligas, vem se desenvolvendo conforme a evolução tecnológica, demanda e necessidade de atender os requisitos da sociedade e da indústria.

Apesar da grande gama de aplicabilidade do aço SAE 4340, como por exemplo, estrutural, aeronáutico, bélico, fixações, eixos, engrenagens, mancais, entre outros, observa-se um problema com relação aos processos de soldagem quando diz respeito aos aços com elevado teor de carbono, devido a essa característica esses aços possuem alta temperabilidade, ou seja, facilmente ocorrem mudanças na estrutura cristalina.

As propriedades mecânicas dos aços têm dependência direta com a sua composição química e tratamentos térmicos aos quais são submetidos, como tratamento térmico entende-se a realização de um aquecimento e resfriamento controlados dos materiais, afim de obter tamanhos de grãos e microestruturas desejadas, desta maneira, otimizando sua utilização e influenciando em seu comportamento durante as solicitações (CALLISTER, 2002).

Tendo em vista esses fatores, pode-se considerar, o aço em questão, como de difícil soldabilidade, pois a energia inerente ao processo não só provoca a fusão do metal base, mas também produz uma zona termicamente afetada (ZTA) que altera as características originais do material possibilitando o surgimento de trincas de resfriamento ou avarias após solicitações mecânicas.

O tratamento criogênico (TC) surgiu como um complemento dos tratamentos convencionais, geralmente feito após uma têmpera. Pode-se dividir esse tratamento em dois tipos: superficial (-80°C) e profundo (-196°C) a depender da temperatura criogênica a que o material é submetido. O principal mecanismo envolvido no TC é a remoção da austenita retida após têmpera e revenimento, transformando-a em martensita. Dentro do processo também ocorre a precipitação de carbonetos ultrafinos distribuídos de forma homogênea em todo o volume da estrutura martensítica, é

atribuída a essas transformações um aumento na dureza e propriedades mecânicas (ZHIRAFAR, 2007; SILVA, 2012; VENGATESH, 2016).

Grande parte dos trabalhos que abordam o TC têm como enfoque os aços ferramentas, de modo que o estudo dos efeitos dessa técnica foi pouco abordado para aços liga, sendo que na maioria das vezes visa-se apenas o comportamento mecânico e não se aprofunda em questões microestruturais e os mecanismos de transformações que acontecem no tratamento térmico referido (MOREIRA, 2009; ZHIRAFAR, 2007).

O objetivo geral desse trabalho consiste em analisar o comportamento mecânico do aço SAE 4340. Os objetivos específicos são a realização da solda utilizando o processo MAG, seguindo-se de um resfriamento à 0° C, e por fim empregando o tratamento criogênico com três diferentes tempos de imersão, 2 horas, 4 horas e sem imersão. Espera-se que o objetivo geral seja alcançado através da análise do perfil de dureza e ensaio de impacto.

Para isso, através dos corpos de prova realizou-se ensaios de micro cargas e impacto, para que fossem comparados os resultados com os corpos de prova não tratados termicamente, a fim de obter um resultado comparativo das características mecânicas citadas.

Como resultado espera-se um aumento significativo das propriedades mecânicas em razão do tratamento criogênico, os meios para alcançar os resultados serão discutidos no decorrer deste trabalho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 AÇOS

As ligas metálicas constituídas por liga de Ferro-Carbono são denominadas aços carbono, o uso abrangente do aço dá-se devido as suas boas propriedades mecânicas, preço e facilidade de produção.

Os aços podem atender diversas demandas, pois apresentam inúmeras características controláveis (PANNONI, 2008).

Aços liga são aços carbono que sofrem a adição proposital de elementos de liga, a fim de melhorar suas propriedades, como resistência mecânica, tenacidade, dureza, entre outras. A composição química e tratamentos térmicos realizados nos aços são cruciais para o desenvolvimento de suas propriedades (SEVALE, 2014).

No presente estudo atentar-se-á, mais em específico ao aço SAE 4340. Para melhor compreensão do assunto, deve-se conhecer previamente alguns conceitos básicos, como, por exemplo, classificação microestrutural, propriedades mecânicas e transformações internas por resfriamento.

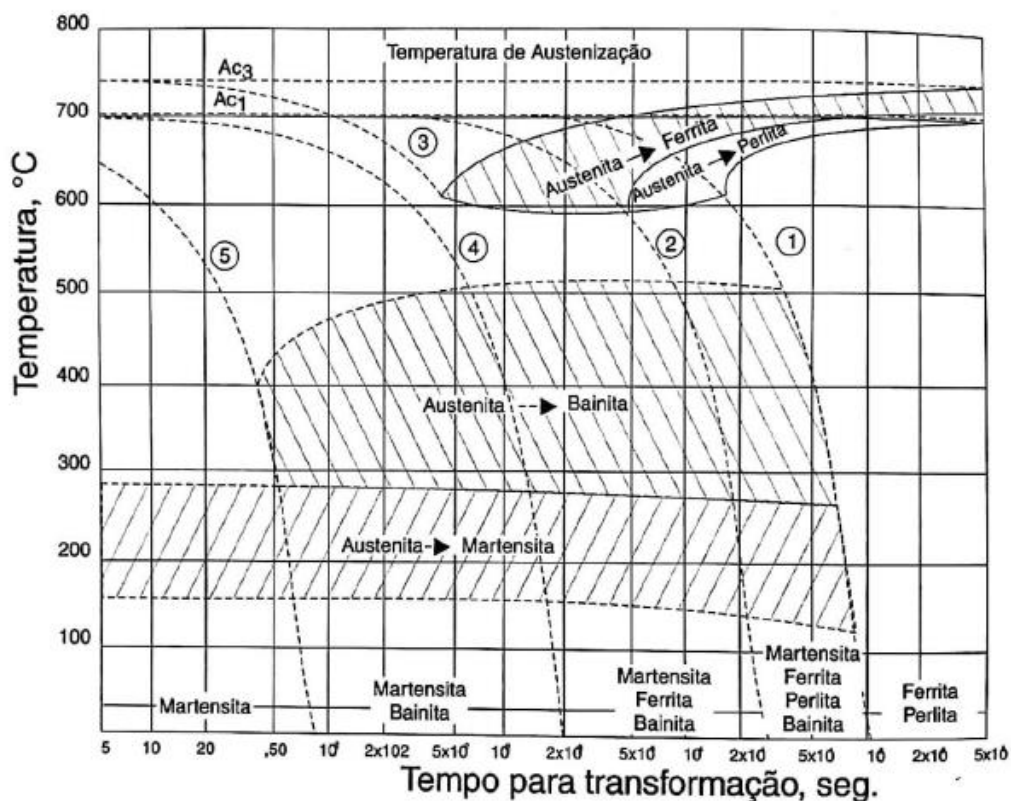
### 2.2 CLASSIFICAÇÃO MICROESTRUTURAL DOS AÇOS

O comportamento mecânico de um material é dependente da sua microestrutura, já a microestrutura é dependente dos elementos de liga adicionados, concentração dos elementos, tempo de aquecimento àquela temperatura, taxa de resfriamento e tratamento térmico (CALLISTER, 2008, p.186; CHIAVERINI, 2002, p.182-183).

As curvas de resfriamento contínuo, utilizado na soldagem, indicam o início e o fim das transformações microestruturais, onde em seus eixos estão a temperatura e o tempo de resfriamento.

Observa-se na figura 1 o diagrama de resfriamento contínuo do aço SAE 4340 com suas possíveis microestruturas.

Figura 1- Curva de resfriamento contínuo de um aço SAE 4340, com curvas de resfriamento superpostas, indicando as várias microestruturas que podem ser obtidas.



Fonte: Chiaverini (2002)

Da figura pode-se observar distintas microestruturas a serem especificadas:

- **Martensita:** estrutura monofásica metaestável, a qual é produto da transformação não-difusional da austenita e sua formação se dá quando o material é submetido a uma alta taxa de resfriamento, não permitindo a difusão do carbono (CALLISTER, 2008, p.239).
- **Austenita:** comum nos aços carbono, só é estável em temperaturas acima de 727°C, possui estrutura de grãos poligonais irregulares, boa resistência mecânica e tenacidade. Não apresenta propriedades magnéticas (CHIAVERINI, 2002, p.32).
- **Bainita:** tem como constituinte as fases ferrita e cementita, por processo de difusão. Possui formato de finas agulhas escuras ou placas, a depender da temperatura que ocorre a transformação (CALLISTER, 2008, p.237).
- **Ferrita:** ferro no estado alotrópico alfa, assim como a austenita possui grãos poligonais irregulares, porém possui baixa dureza e resistência à tração, contudo possui excelente resistência ao choque (CHIAVERINI, 2002, p.32).

- Perlita: são grão que se agrupam como “colônias” onde as camadas são orientadas na mesma direção, sendo que essa direção varia de uma colônia para outra. São formadas pela mistura da ferrita e da cementita. O comportamento mecânico fica entre a cementita dura e frágil e a ferrita macia e dúctil (CALLISTER, 2008, p.213; CHIAVERINI, 2002, p.32).

Para o presente trabalho e estudo dos fenômenos ocorridos nos processos de soldagem, tempera e tratamento criogênico, as microestruturas mais relevantes, devido à alta taxa de resfriamento, são a austenita e a martensita.

### 2.3 AÇO SAE 4340

O SAE 4340 é um aço baixa liga, médio carbono e de alta resistência, possui 0,40% de carbono, e é ligado ao Níquel (1,65% a 2%), Cromo (0,40 a 0,90%) e ao Molibdênio (0,20% a 0,30%). Apresenta elevada temperabilidade, resistência mecânica e boa tenacidade, embora sua usinagem e soldabilidade deixem a desejar. Além do exposto, o aço em questão possui facilidade para tratamento térmico e apresenta resistência à fadiga satisfatória. Sua dureza após têmpera varia de 54 a 59 HRC (SOUZA, 2006; CARDOSO 2011).

A soldabilidade tem como influência a composição química do metal a ser soldado, a predisposição da formação de soluções sólidas coesas entre o metal base e o metal de adição. O surgimento de trincas induzidas pelo hidrogênio é tido como o principal motivo para a baixa soldabilidade de aços baixa liga e médio carbono, da mesma maneira que podem ocorrer trincas de solidificação e diminuição da tenacidade (MODENESI, 2011; CORDEIRO, 2013).

Os elementos de liga de modo geral, com exceção do cobalto, transladam a curva de resfriamento para a direita, retardando a formação da austenita. Tais elementos ficam dissolvidos na austenita e as reações que eles provocam são concorrentes e tendem a formar carboneto, como existe uma complexidade nessas reações adicionais, um tempo maior é demandado para serem realizadas e completadas. Vale notar que esse deslocamento favorece a formação, por resfriamento, da estrutura martensítica (CHIAVERINI, 2002, p.53-54).

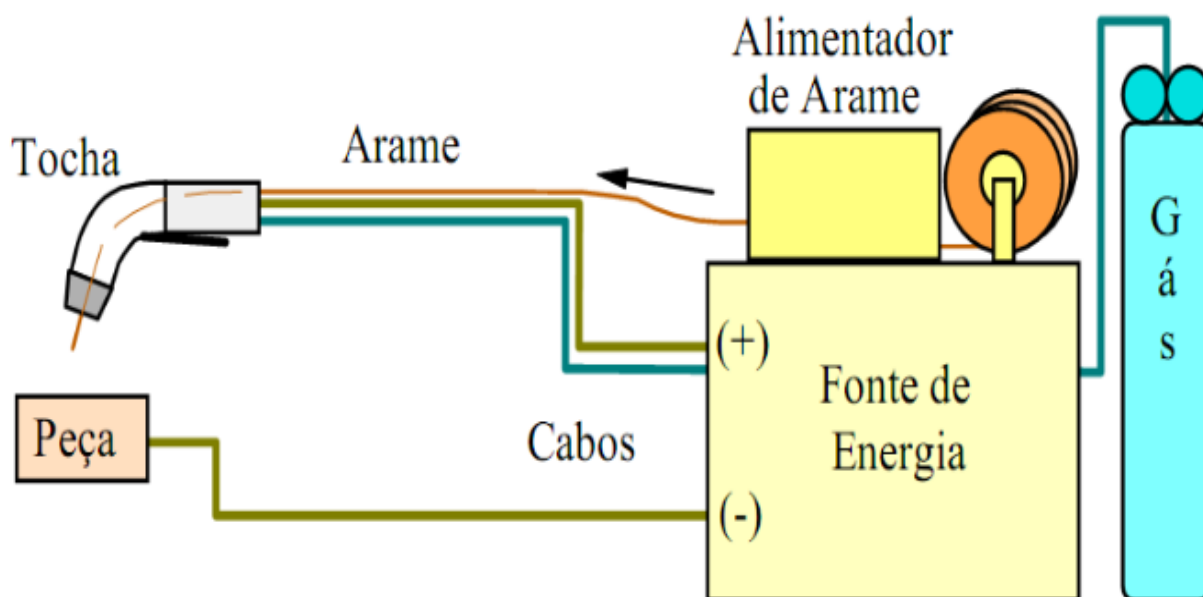
## 2.4 SOLDAGEM MAG

O processo de soldagem MAG (metal active gás) é muito utilizado devido sua versatilidade, possibilidade de automação e viabilidade de solda em todas as posições (ASM, 1993).

Funciona por meio de um arco elétrico que é mantido por um eletrodo consumível, sendo que a proteção do arco se dá por um gás reagente, usualmente utiliza-se o CO<sub>2</sub>. Pode ser utilizado para a soldagem de todos aços baixo carbono e aços baixa liga (WAINER, 2004 p.99).

A figura 02 representa de maneira esquemática o processo de solda MAG.

**Figura 2 - Componentes para soldagem MAG**



Fonte - Modenesi e Marques (2006)

O processo traz como vantagem, além das já citadas, a alimentação contínua do eletrodo, elevada velocidade de soldagem, grande taxa de deposição, ausência de escória, baixo teor de hidrogênio e problemas com tensões residuais reduzidos. Como desvantagem observa-se o resfriamento rápido, podendo ocasionar trincas, grande quantidade de respingos e equipamento menos portátil com relação ao processo com eletrodo revestido (WAINER, 2004 p.99-100).



## 2.5 SOLDAGEM MAG AÇO SAE 4340

A temperabilidade do aço SAE 4340 faz com que cuidados sejam tomados no momento da solda.

Apesar de simples, o processo de soldagem mostra-se muitas vezes agressivo para o material, pois aplica-se grande densidade energética em uma pequena seção do material, o que pode provocar alterações microestruturais e de propriedades mecânicas, como a diminuição da tenacidade (MODENESI, 2004).

As modificações microestruturais podem provocar tensões residuais nas zonas soldadas, provocando consequências indesejáveis, tais como trincas e dureza elevada limitando sua utilização (PUKASIEWICZ et. al. 2004)

Recomenda-se realizar um preaquecimento entre 150 e 260°C para a soldagem do aço SAE 4340. Tratamentos térmicos posteriores podem se fazer necessários para o alívio de tensões residuais e redução de dureza que podem ser causadas nas zonas termicamente afetadas (MODENESI, 2011).

## 2.6 TRATAMENTO TÉRMICO DE PRODUTOS SOLDADOS

Pode-se dizer que os tratamentos térmicos são processos de aquecimento e resfriamento controlados das ligas metálicas, a fim de obter transformações desejadas em sua microestrutura de modo a se ter características e propriedades de interesse.

Alguns dos parâmetros que possuem influências nos tratamentos são: a temperatura de aquecimento, tempo de aquecimento, taxa de resfriamento e atmosfera do forno (KALPAKJIAN, 2009, p.111-112; CHIAVERINI, 2002, p.81-86).

Com a adoção do tratamento térmico busca-se a remoção de tensões, variações na dureza, melhora na resistência mecânica, ductilidade, usinabilidade, resistência superficial, resistência à corrosão, entre outras (CHIAVERINI, 2002, p.81).

Como exemplos de tratamentos térmicos após soldagem temos a têmpera, onde procura-se aumentar a resistência por meio de uma alta taxa de resfriamento, fazendo com que parte da microestrutura se transforme em martensita e o revenimento, onde busca-se aumentar a tenacidade visto que ocorrem alívios de tensões nas microestruturas.

## 2.7 TRATAMENTO CRIOGÊNICO

Considera-se o tratamento criogênico como um tratamento térmico suplementar, o qual o material é submetido a temperaturas de aproximadamente -196° C e é realizado após uma têmpera e revenido. Sua maior contribuição se consiste em transformar a austenita retida em martensita e como mecanismo secundário, têm-se a formação de pequenos carbonetos dissolvidos de maneira homogênea na estrutura martensítica (ZHIRAFAR, 2007).

A austenita é retida devido a necessidade de uma grande perda de energia térmica durante o resfriamento.

Quando não se obtém uma taxa de resfriamento elevada, ocorre a transformação incompleta da austenita, sendo a estrutura resultante chamada de austenita retida (COLLINS, 1996).

Como vantagens do tratamento criogênico pode-se citar o aumento da dureza, resistência superficial, alívio de tensões, aumento da resistência à fadiga e estabilidade dimensional (VENGATESH, 2016).

## 2.8 PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas dos metais representam como o material irá se comportar após solicitações mecânicas impostas, como propriedades pode-se citar o limite de escoamento, resistência à tração, ductilidade, resiliência, tenacidade, dureza e resistência ao impacto.

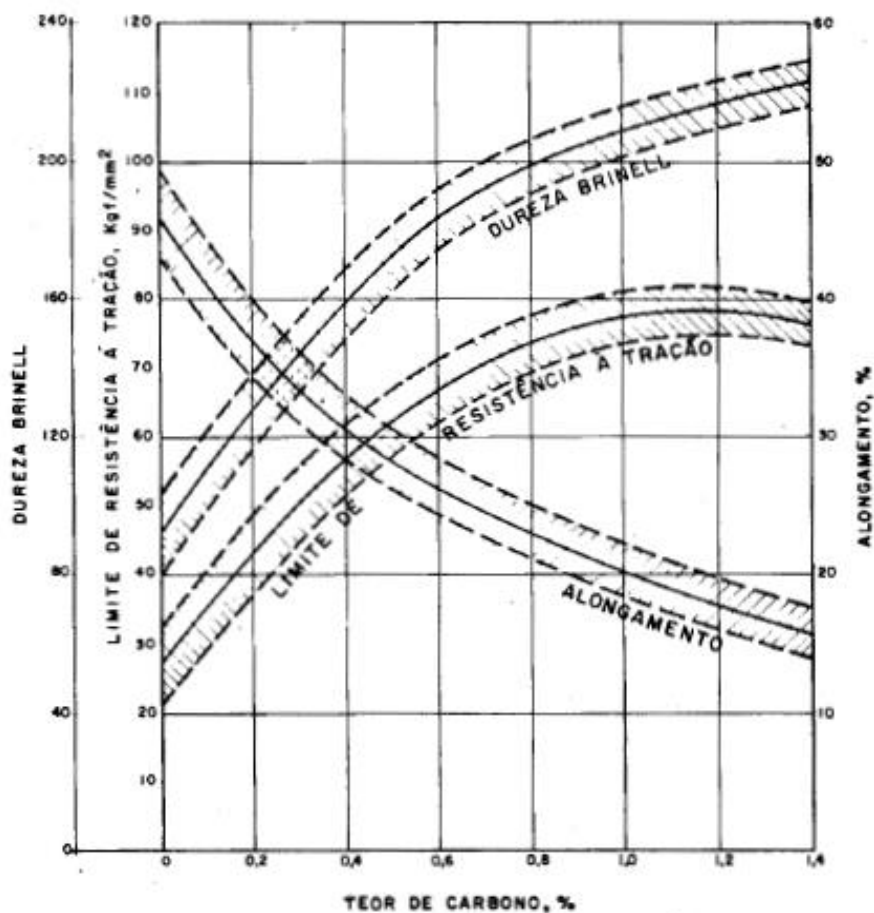
Define-se dureza como uma medida de resistência localizada à deformação plástica (CALLISTER, 2008, p.114).

A resistência ao impacto está ligada à tenacidade do material, sendo a tenacidade a capacidade que o material tem de absorver energia até sua fratura (CALLISTER, 2008, p.111).

Um dos fatores que influenciam o comportamento mecânico dos aços é sua microestrutura, composição química e o teor de carbono. Conforme o teor de carbono aumenta as propriedades mecânicas se alteram, tais como limite de escoamento, limite de resistência à tração, dureza e ductilidade (CHIAVERINI, 2002, p.34).

Na figura 3 pode-se observar a influência do teor de carbono para aços recozidos (resfriados lentamente, após aquecimento acima da zona crítica).

Figura 3 - Influência do teor de carbono na dureza, resistência à tração e ductilidade



Fonte: Chiaverini (2002)

Conforme a figura, consegue-se estimar os valores aproximados de propriedades mecânicas conforme o teor de carbono presente no aço.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Embora seja evidente que todas as propriedades sejam importantes no estudo dos materiais, dar-se-á foco nas analisadas no presente trabalho, dureza e resistência ao impacto, sabe-se também que após soldados, na maioria das vezes, todas as propriedades podem sofrer alterações, porém somente a dureza e o impacto serão analisados neste momento.

Para a análise das influências do tratamento criogênico nas propriedades mecânicas do aço SAE 4340 soldado pelo processo MAG, preparou-se nove corpos de prova, subdivididos em três grupos de amostras, as quais foram submetidas à soldagem MAG, tratamento criogênico em três tempos de imersão (sem imersão, 2 horas e 4 horas), ensaio de impacto e ensaio de micro cargas para a análise da dureza dos corpos de prova. Para se obter os resultados, realizou-se uma análise comparativa dos resultados para sustentar os dados alcançados.

O grupo sem imersão servirá como um parâmetro quantitativo de comparação das mudanças provenientes do tratamento.

#### 3.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram retirados de um tarugo de 2 pol. de um aço SAE 4340 e possuem o dimensionamento de 50mm de comprimento, 25mm de largura e 10mm de espessura.

Com velocidade de corte lenta e com o auxílio de um sistema de jato d'água, a fim de evitar aquecimento e alteração microestrutural, contratou-se uma empresa especializada em processamento de metais para o corte e confecção dos corpos de prova para os ensaios de dureza e impacto.

Finalizada esta etapa, separou-se em três grupos de igual número, para que os procedimentos pudessem ser realizados. Um desses grupos seguiu todas as etapas de análise, excluindo apenas o tratamento criogênico, servindo dessa maneira como referência dos efeitos da soldagem no aço.

### 3.2 SOLDAGEM

Empregou-se o uso de um babador composto de aço SAE 1020, para que pedaços de metais pudessem ser utilizados de modo a iniciar e finalizar o arco, após a soldagem estes pedaços são desprezados, fazendo com que o cordão de solda no corpo de prova não apresente defeitos devido à instabilidade do arco comum no início e no fim da soldagem, fazendo com que ocorra uma homogeneidade no decorrer de todo o cordão.

Com o propósito de manter os parâmetros velocidade de soldagem e distância da tocha constantes, utilizou-se um acessório denominado “tartaruga” do fabricante e modelo Tartílope V1, com movimento automático e regulagem de altura.

A soldagem MAG contou com gás com 20% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e argônio como gás de proteção, para estabilizar e proteger o arco elétrico.

Adotou-se os seguintes parâmetros para soldar os corpos de prova:

- Convencional sinérgico de 140A
- Velocidade de avanço 36 cm/min
- Velocidade do arame 4,8 m/min
- Tensão 19,9V (Medido)
- Corrente média 158A (Medido)
- Vazão do gás de proteção 20 L/min

Os valores de tensão e corrente foram obtidos pela fonte de energia, a qual mede estes parâmetros e indica no visor, o equipamento utilizado foi uma fonte DigiPlus A7 da marca IMC com arame E70S-6.

### 3.3 TRATAMENTO CRIOGÊNICO

Para realizar o tratamento criogênico, resfriou-se os seis corpos de prova em uma mistura de água e gelo, visando diminuir a diferença de temperatura entre os corpos de prova e o nitrogênio líquido evitando desperdício de nitrogênio.

Após este processo, os dois grupos de amostras seguiram para a imersão no nitrogênio líquido em um recipiente adequado chamado *dewar* e devidamente numerado durante o período de 2 e 4 horas.

Para fixação do suporte das amostras no *dewar*, facilidade de manuseio e segurança no processo, utilizou-se um arame de aço carbono. Depois de numeradas as amostras, colocou-se separadamente para que os diferentes tempos de imersão estipulados fossem atendidos.

Após atingir o tempo determinado as amostras foram colocadas em temperatura ambiente até estar em equilíbrio térmico com o meio.

### 3.4 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA ENSAIO DE DUREZA COM MICRO CARGAS E IMPACTO

Para a preparação das amostras utilizou-se uma serra de precisão Buehler IsoMet, modelo 4000, equipada com lubrificação automática e disco de corte ISOCUT.

Cortou-se transversalmente, os nove corpos de prova, de modo que ficasse exposta a zona fundida, a ZTA e o metal base, a uma velocidade de avanço de 2mm/min e uma rotação de 4000 RPM. Na sequência realizou-se um embutimento das peças a frio, a fim de evitar aquecimentos, preservando a microestrutura e desta maneira, não influenciar nos resultados.

Após embutimento, iniciou-se o lixamento com uma série de lixas d'água com granulometrias de 300, 400, 600 e 1200 por 5 minutos cada, mudando o sentido de lixamento em 90° de uma lixa para outra, esse procedimento deu-se até que as marcas da etapa anterior não estivessem mais presentes na amostra.

Ocorreu posteriormente ao lixamento o polimento com um pano para polimento e suspensão de alumina com diferentes granulometrias, 3µm, 1µm e 0,1µm, seguindo essa sequência até o acabamento final.

Para finalizar as amostras do ensaio de micro carga, foi feito um ataque químico com Nital 3% por 4 segundo, com o intuito de revelar a microestrutura.

Ademais, fez-se necessária a preparação das amostras para o ensaio Charpy, de acordo com a norma E 23 – 02a, onde será realizada uma comparação quantitativa com relação às amostras não tratadas termicamente. Para confecção dos chanfros optou-se pelo método da eletroerosão. Os corpos de prova permaneceram com as mesmas dimensões, exceto a largura que foi modificada para um novo valor correspondente a 10mm.

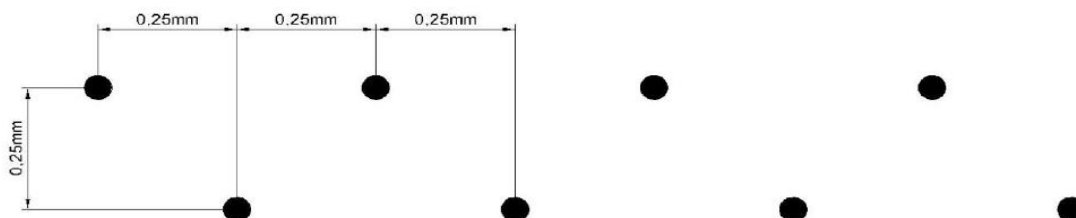
### 3.5 ENSAIO DE MICRO CARGAS

Utilizou-se um microdurômetro Time MHV-1000, com penetrador Vickers, no qual foi aplicado uma carga de 9,807N HV1.

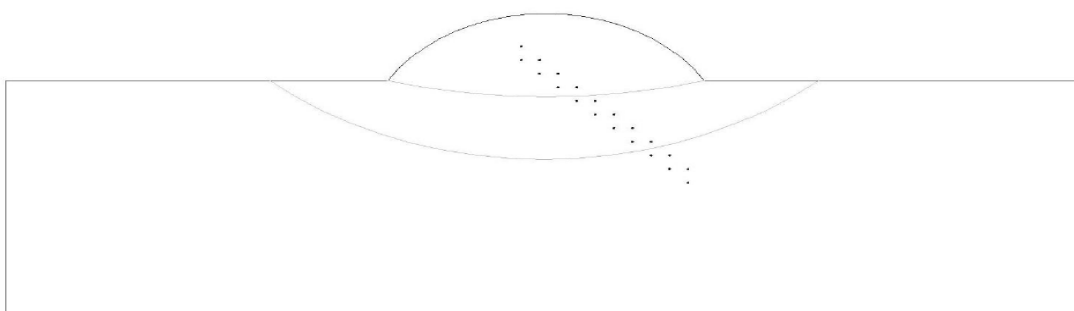
O procedimento automático do microdurômetro possui tempo de permanência de 60 segundos.

As figuras 4 e 5 demonstram a metodologia adotada para o ensaio de dureza, no que diz respeito ao posicionamento dos pontos ensaiados. Os pontos foram ensaiados tendo início na zona fundida em direção ao metal base.

**Figura 4 - Esquema sequencial de pontos ensaiados**



**Figura 5 - Visão macro dos pontos ensaiados**



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 ENSAIO DE DUREZA COM MICRO CARGAS

Terminado o tratamento de criogenia e confeccionadas as amostras conforme explicitado nos materiais e métodos, fez-se o ensaio de micro cargas Vickers (HV).

Na tabela 1 são apresentados os resultados dos ensaios de durezas com micro cargas para as amostras sem imersão.

**Tabela 1 – Resultados micro cargas nas amostras sem imersão**

S/ imersão Ponto	Dureza (HV)		
	CP 1	CP 2	CP 3
1	362,7	370,5	305,3
2	338,6	329,7	341,5
3	238,1	284	343,8
4	634,5	322,1	324,2
5	234	644,8	316,33
6	242,9	320	318,9
7	265,2	254,8	664,8
8	207,1	272,9	256,7
9	276,2	217,9	224,2
10	226,7	238,8	217,9
11	275,8	262	216,7

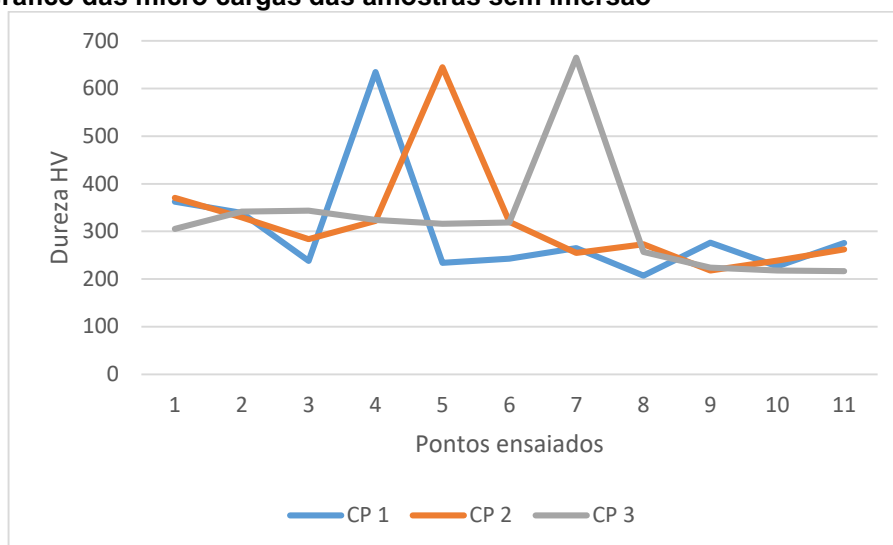
**Fonte: Autoria própria**

Pode-se notar um valor elevado de dureza na zona termicamente afetada dos três corpos de prova em comparação com a zona fundida e o metal base. Os valores da tabela 1 serão utilizados para representar visualmente, através de um gráfico de linhas os valores obtidos.

Na figura 6 é exibido o gráfico das micro cargas das amostras sem imersão.



**Figura 6 - Gráfico das micro cargas das amostras sem imersão**



Fonte: Autoria própria

No gráfico nota-se os picos acentuados representando a diferença de dureza nas zonas termicamente afetadas e a influência da solda realizada no aço SAE 4340.

Na tabela 2 são apresentados os resultados das micro cargas para as amostras com 2 horas de tratamento.

**Tabela 2 - Resultados das micro cargas nas amostras com tratamento de 2 horas**

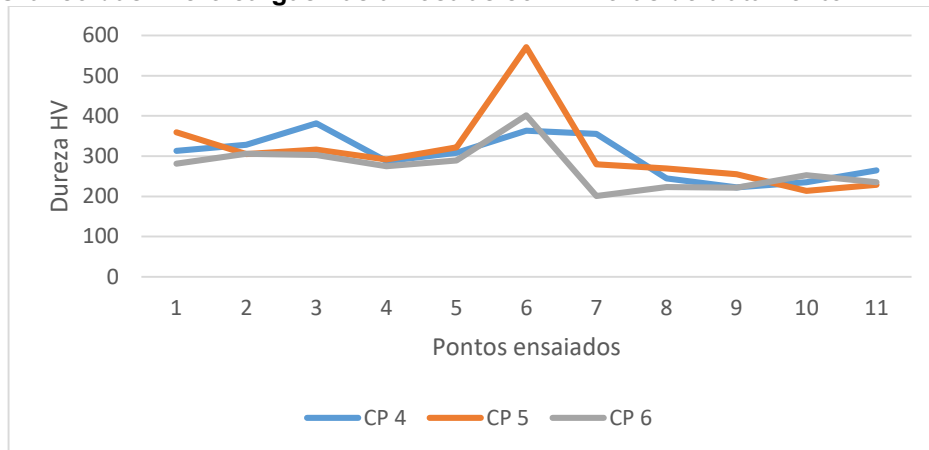
C/ 2 horas Pontos	Dureza (HV)		
	CP 1	CP 2	CP 3
1	312,8	359	281,3
2	328,6	305,3	305,8
3	381,8	316,3	302,8
4	287,6	291,6	274,9
5	308,2	322,1	289,3
6	363,4	570,8	401,7
7	355,2	279,6	201,2
8	244,3	269,6	223
9	222,1	254,8	221,2
10	235,4	213,5	252,9
11	264,4	228,6	235,1

Fonte: Autoria própria

Na tabela pode-se perceber que os valores da fundida e do metal base não sofrem alterações consideráveis.

Na figura 6 é exibido o gráfico das micro cargas das amostras com 2 horas de tratamento.

**Figura 7 - Gráfico das micro cargas nas amostras com 2 horas de tratamento**



**Fonte: Autoria própria**

No gráfico das amostras com 2 horas de tratamento, sem um pico aparente, a curva do corpo de prova CP4 demonstrou um padrão diferente das demais, isso ocorreu devido a um erro de ensaio, os picos representam as zonas termicamente afetadas. Na tabela 3 são apresentados os resultados das micro cargas para as amostras com 4 horas de tratamento.

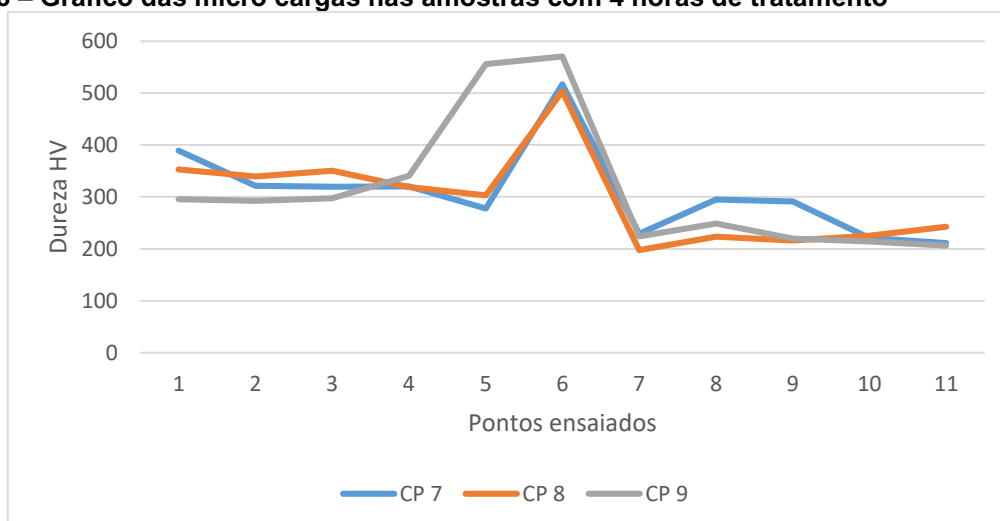
**Tabela 3- Resultados das micro cargas nas amostras com tratamento de 4 horas**

C/ 4 horas Pontos	Dureza (HV)		
	CP 1	CP 2	CP 3
1	389,5	352,8	295,7
2	321,6	339,2	292,9
3	320	350,4	297,6
4	320,5	318,9	340,9
5	277,9	303,3	556
6	517,3	503,5	570,8
7	229,3	197,6	223,9
8	294,8	223,3	248,5
9	291,6	215,8	220
10	221,2	225,5	214,4
11	211,3	242,9	206,3

Fonte: Autoria própria

A tabela 3 apresentou valores elevados de dureza na zona termicamente afetada, formando picos de dureza característicos dessas regiões.

Na figura 8 é exibido o gráfico das micro cargas das amostras com 4 horas de tratamento.

**Figura 8 – Gráfico das micro cargas nas amostras com 4 horas de tratamento**

Fonte: Autoria própria

O gráfico das amostras com 4 horas de tratamento apresenta as zonas de metal fundido, zona termicamente afetada e metal base bem definidas, sendo os picos na zona termicamente afetada.

Na tabela 4 são exibidos os resultados das micro cargas para as amostras com e sem tratamento.

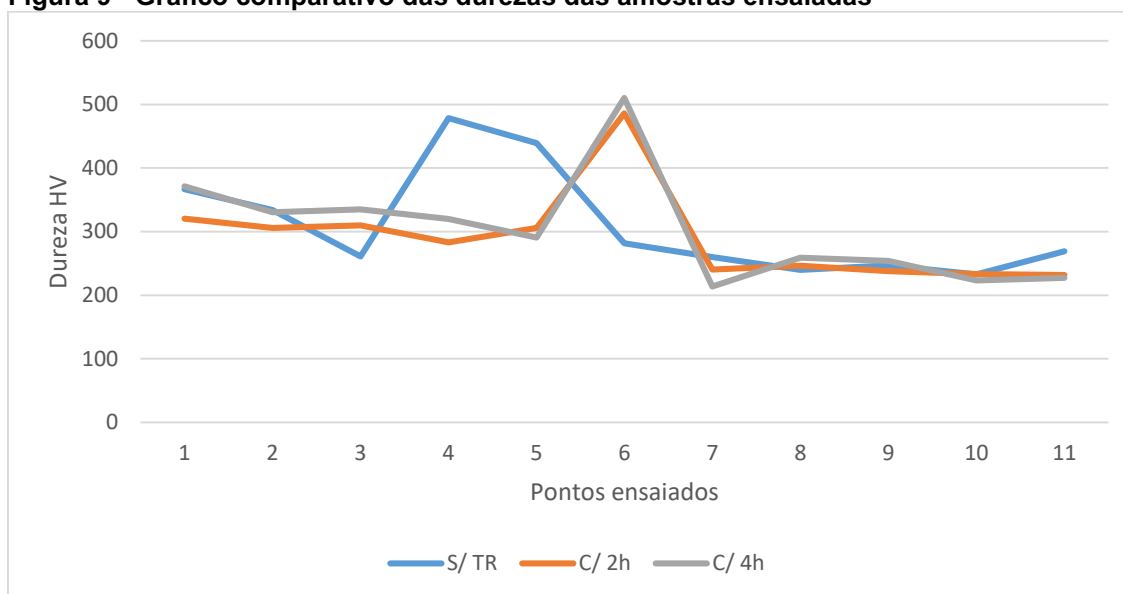
**Tabela 4 - resultados agrupados das amostras**

Pontos	CP 1-s	CP 2-s	CP 3-s	CP 4-2h	CP 5-2h	CP 6-2h	CP 7-4h	CP 8-4h	CP 9-4h
1	362,7	370,5	305,3	312,8	359	281,3	389,5	352,8	295,7
2	338,6	329,7	341,5	328,6	305,3	305,8	321,6	339,2	292,9
3	238,1	284	343,8	381,8	316,3	302,8	320	350,4	297,6
4	634,5	322,1	324,2	287,6	291,6	274,9	320,5	318,9	340,9
5	234	644,8	316,33	308,2	322,1	289,3	277,9	303,3	556
6	242,9	320	318,9	363,4	570,8	401,7	517,3	503,5	570,8
7	265,2	254,8	664,8	355,2	279,6	201,2	229,3	197,6	223,9
8	207,1	272,9	256,7	244,3	269,6	223	294,8	223,3	248,5
9	276,2	217,9	224,2	222,1	254,8	221,2	291,6	215,8	220
10	226,7	238,8	217,9	235,4	213,5	252,9	221,2	225,5	214,4
11	275,8	262	216,7	264,4	228,6	235,1	211,3	242,9	206,3

**Fonte: Autoria própria**

Os valores de dureza agrupados na tabela, representando todos os corpos de prova ensaiados, facilita a comparação e visualização dos resultados obtidos.

A figura 9 ilustra a média dos dados coletados por categoria, para a média desprezou-se um corpo de prova de cada categoria, aqueles que apresentavam valores muito discrepantes foram descartados da análise, dessa maneira foram computados os valores em um *software* específico para a obtenção do gráfico.

**Figura 9 - Gráfico comparativo das durezas das amostras ensaiadas**

Fonte: Autoria própria

De maneira retratada na figura 9, pode-se observar a influência do tratamento térmico nas amostras.

A fim de descrever os resultados expõe-se que os picos representam as zonas termicamente afetadas por meio da solda, a direita temos a dureza do metal base e a esquerda pode-se observar a dureza na zona fundida.

Do tratamento resultou-se um leve aumento da dureza nas regiões termicamente afetadas pela solda, regiões essas que já são mais duras, pelo mecanismo de endurecimento inerente ao processo de soldagem, porém a forma com que esse processo ocorre não é objetivo desse trabalho.

Pressupunha-se que ocorresse, além da transformação da austenita retida em martensita, a formação de pequenos carbonetos dissolvidos de maneira homogênea na estrutura martensítica (ZHIRAFAR, 2007).

Como consequência dessas transformações observou-se um aumento na dureza do material, criando indícios que de fato a estrutura martensítica aumentou sua quantidade nos corpos de prova.

## 4.2 ENSAIO DE IMPACTO

Terminado o tratamento de criogenia e confeccionadas as amostras conforme explicitado nos materiais e métodos, fez-se o ensaio de impacto Charpy para medir a energia absorvida até a ruptura do material.

Os resultados demonstrados nesse trabalho são os valores máximos absorvidos.

Na tabela 5 são apresentados os resultados colhidos nos ensaios de impacto para todas as amostras.

A sigla “st” representa as amostras sem tratamento térmico.

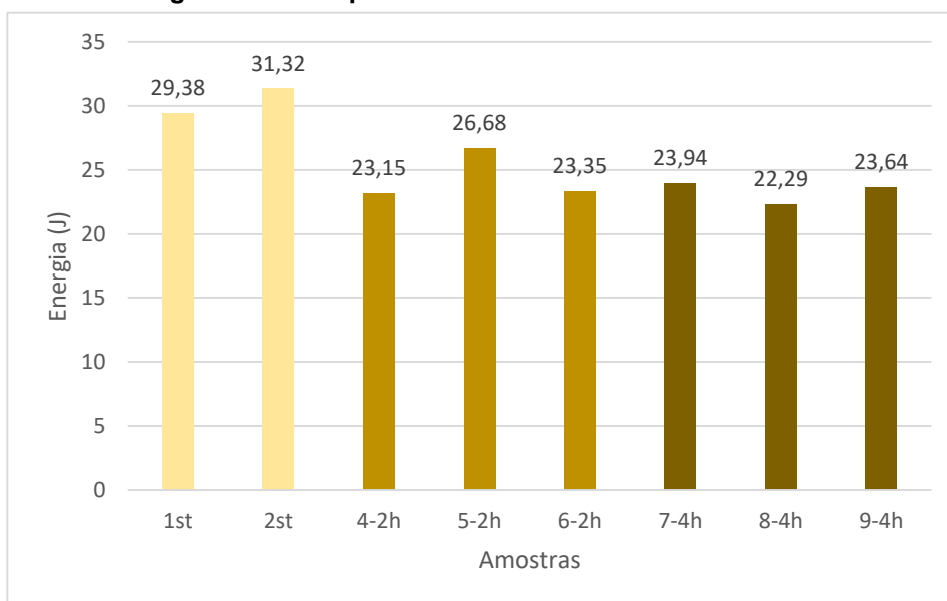
**Tabela 5 - Tabela da energia absorvida até a fratura**

Energia Absorvida (J) por amostra	
1st	29,38
2st	31,32
3st	23,25
4-2h	23,15
5-2h	26,68
6-2h	23,35
7-4h	23,94
8-4h	22,29
9-4h	23,64

**Fonte - Autoria própria**

A amostra 3st apresentou erro no ensaio, pois ocorreu erro de dimensionamento do chanfro, ficando fora da norma técnica que atende ao ensaio específico, por esse motivo desprezou-se os seus resultados para fins de resultados.

O gráfico apresentado na figura 10 expõe os valores obtidos nos ensaios de impacto.

**Figura 10 - Gráfico da energia absorvida pelas amostras**

**Fonte - Autoria própria**

Como comentado anteriormente no ensaio de dureza, há indícios de que a quantidade de martensita das amostras tratadas tenham aumentado com relação às não tratadas, como consequência os corpos de prova absorveram menos energia que as amostras não tratadas, demonstrando menor resistência ao impacto, acredita-se que tal fenômeno ocorreu devido ao fato da martensita possuir uma estrutura mais dura e frágil, quando comparada com a austenita.

A imagem 11 ilustra as seções fraturadas dos corpos de prova, da esquerda para a direita, sem tratamento, 2 horas e 4 horas.

Figure 11 - Aspectos da fratura no material ensaiado



Fonte - Autoria própria

Observa-se que as fraturas apresentam aspectos de fratura dúctil na zona fundida e aspectos de fratura frágil no metal base, com o aumento do tempo de tratamento o aspecto de fratura frágil aumentou.

A diferença entre a maior resistência nas amostras não tratadas, com relação às tratadas, chega a ser 28,76% superior no que diz respeito a resistência ao impacto, diferença considerável para materiais de aplicação mecânica.

Embora o tratamento criogênico como mecanismo primário tenha aumentado a dureza das amostras com a possível transformação da austenita retida em martensita, acredita-se que o tempo de tratamento se mostrou pequeno para que ocorresse a formação de pequenos carbonetos na estrutura martensítica, como mecanismo secundário que é observado a partir de 8 horas de imersão, e conseqüentemente o alívio de tensões da microestrutura (ZHIRAFAR, 2007; MOREIRA, 2009).



## 5 CONCLUSÃO

Com os resultados e discussões da influência do tratamento criogênico após soldagem mag do aço sae 4340, pôde-se concluir:

- Houve um aumento dos valores de dureza nas zonas termicamente afetadas de todas as amostras em que foram submetidas ao tratamento criogênico com relação às amostras em que não foram submetidas ao tratamento.
- Na zona fundida e no metal base não ocorreu um aumento de dureza significativo.
- Não ocorreram variações significativas nos valores de dureza obtidos em todos os pontos ensaiados nas amostras tratadas criogenicamente em 2 horas e 4 horas.
- Ocorreu uma diminuição da energia absorvida no ensaio de impacto em todas as amostras tratadas, demonstrando maior fragilidade.

Para aplicações em que exigem maior dureza, sem a necessidade de uma ductilidade elevada, o tempo de tratamento de 2 horas mostrou-se benéfico, já que a diferença entre os tratamentos de 2 horas e 4 horas não apresentaram diferenças significativas nos valores de dureza.

## REFERÊNCIAS

ABNT ASM INTERNATIONAL. **Welding Brazing and Soldering**. Vol. 6, 1993. 2871p

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 589 p.

CARDOSO, Andréia de Sousa Martins. **Caracterização mecânica e microestrutural dos aços SAE 4340 e 300M após soldagem a laser e tratamento superficial de nitretação a plasma**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo, USP, 2011. 112p: il.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. 7. ed. São Paulo, SP: ABM, 2002. 599 p.

COLLINS, D. N. **Deep cryogenic treatment of tool steels: a review**. Heat Treatment of Metals, v. 23, n.2, p. 40-42, 1996.

CORDEIRO, Amilton. **Tecnologia da Soldagem**. Sorocaba: Centro Paula Souza, 2013.

KALPAKJIAN, S. **Manufacturing Engineering and Technology**. 6. Ed. New Jersey. Prentice Hall, 2002. 1141p

MODENESI, Paulo J..**Soldabilidade de Algumas Ligas Metálicas**. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte,2011.

MODENESI, P.J.; MARQUES, P.V. **Soldagem I: Introdução aos processos de Soldagem** .Belo Horizonte: Editora UFMG, 2006. 54p.

MODENESI, P. J. **Transferência de metal na soldagem GMAW -Manual aula prática**, UFMG. Belo Horizonte, 2004.

MOREIRA, J. C.; et al. **Influência do tratamento criogênico na usinabilidade do aço rolamento ABNT 52100 temperado**. Revista Matéria, Rio de Janeiro (RJ), v. 14, n. 3, p. 932-946, 2009.

PANNONI, F. D. **Aços estruturais**. USP. 2010.

PUKASIEWICZ, A. G. M.; HENKE, S. L.; CASAS, W. J. P. **Influência do tratamento pós-soldagem na propagação de trincas por fadiga em juntas soldadas do aço inoxidável martensítica macio CA6NM**. Soldagem Insp.v.10, n.3, jul/set 2005

SAMUELS, L. E. **Light Microscopy of Carbon Steels**. Materials Park, Ohio: ASM International. 1999. 500 p.

SEVALE, L. G. **Estudo Da Influência De Tratamentos Térmicos Nas Variações Microestruturais Do Aço Sae 4340**. Universidade De Brasília. Projeto de Graduação. Faculdade De Tecnologia Departamento De Engenharia Mecânica. 2014.

SILVA, S. E. T. P. da. **Análise das propriedades mecânicas e estruturais do aço SAE 4140 submetido a tratamento criogênico**. 2012. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2012.

VANGATESH, M.; et al. **Review on cryogenic treatment of steels**. International Research Journal of Engineering and Technology, India, vol. 3, p. 417-422, out. 2016.

VLACK, L. H V.. **Princípios de Ciência e Tecnologia dos Materiais**. 4. ed. Rio de Janeiro: RJ: Campus. 1984. 567 p.

WAINER, E.; BRANDI, Sérgio D.; MELLO, F. D. H. de. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. São Paulo: Blucher, 2004. 494 p.

ZHIRAFAR, S.; REZAEIAN, A.; PUGH, M. **Effect of cryogenic treatment on the mechanical properties of 4340 steel**. Journal of Materials Processing Technology, n. 186, p. 298-303, jan. 2007.