

N. CLASS. M 671.52  
CUTTER M 6725  
ANO/EDIÇÃO 2014

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**  
**LUIZ FERNANDO MIRANDA**

**SOLDAGEM: avaliação do efeito na dureza da soldagem de aço transformável AISI 4340 por arame tubular (FCAW) utilizando consumível OK TubRod 95K2 com variações de corrente de 260 a 280 A e aplicação de tratamentos térmicos**

**Varginha**

**2014**

**LUIZ FERNANDO MIRANDA**

**SOLDAGEM: avaliação do efeito na dureza da soldagem de aço transformável AISI 4340 por arame tubular (FCAW) utilizando consumível OK TubRod 95K2 com variações de corrente de 260 a 280 A e aplicação de tratamentos térmicos**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel sob orientação do Prof. Esp. Fabiano Farias de Oliveira

**Varginha**

**2014**

**LUIZ FERNANDO MIRANDA**

**SOLDAGEM: avaliação do efeito na dureza da soldagem de aço transformável AISI 4340 por arame tubular (FCAW) utilizando consumível OK TubRod 95K2 com variações de corrente de 260 a 280 A e aplicação de tratamentos térmicos**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel pela Banca Examinadora composta pelos membros:

**Data** / /

---

Prof. Esp. Fabiano Farias de Oliveira

---

Prof. Me. Hugo Rodrigues Vieira

---

Prof. Esp. Adilene Maria Soares Tirelli

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela força e paciência;

A minha família pelo apoio e incentivo;

A meu orientador pela paciência e dedicação;

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo principal a avaliação do efeito na dureza da soldagem de aço transformável AISI 4340 por arame tubular (FCAW), utilizando consumível OK TubRod 95K2 com 1,2 mm de diâmetro. Os testes foram realizados utilizando correntes de soldagem entre 260 e 280 A, outro fator avaliado foi a efetividade da aplicação de tratamento térmicos de pré e pós-aquecimento utilizando-se respectivamente as temperaturas de 300 °C e 550 °C. Após a soldagem foram realizados ensaios de dureza, e os resultados foram demonstrados em gráficos para avaliação, viu-se que este material apresentou comportamento satisfatório quando submetido a tratamentos térmicos, porém apresentou uma queda significativa na resistência superficial quando estes foram aplicados.

**Palavras chave:** Aços transformáveis. Tratamento térmico. Soldagem por arame tubular.

## **ABSTRACT**

*The present work has as main objective to evaluate the effect on hardness in the welding of AISI 4340 steel by flux cored wire (FCAW) using consumable OK Tubrod 95K2 with 1.2 mm diameter. The tests were carried out using welding currents between 260 and 280 A, another factor was evaluated the effectiveness of applying thermal treatment of pre- and post-heating respectively, using temperatures of 300 ° C and 550 ° C. After the welding hardness tests were performed, and the results into graphics for review, it was seen that this material appeared satisfactory behavior when subjected to heat treatments, but did not show a significant drop in surface resistance when they were applied.*

*Keywords: transformable steels, heat treatment, welding flux cored wire.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Esquema de montagem do equipamento de soldagem com arame tubular....	14
Figura 02: Processo arame tubular auto protegido.....	15
Figura 03: Processo arame tubular com proteção gasosa.....	16
Figura 04:Tipos de transferêncimetálica.....	21
Figura05: Tipos de juntas soldadas.....	21
Figura 06: Tipos de chanfros utilizados na soldagem dos diversos tipos de junta.....	22
Figura07: Elementos do Chanfro.....	23
Figura 08: Representação esquemática de uma peça metálica e seus níveis estruturais..	25
Figura 09: Representação esquemática do processo de redução.....	27
Figura 10: Serra de Fita.....	28
Figura 11:Exemplo de gráfico Tensão x Deformação.....	32
Figura 12:Esquema de montagem de máquina de ensaio universal.....	33
Figura13: Durômetro.....	34
Figura 14:Fonte de energia CV-420 esistema de alimentação de arame LF-33.....	36
Figura 15: Mesa de soldagem mecanizada com sistema de deslocamento da tocha.....	36
Figura 16:Bancada de ensaios de soldagem.....	37
Figura 17:Forno tipo Câmara utilizado para os tratamentos térmicos.....	37
Figura 18:Serra de fita.....	38
Figura 19: Fluxograma experimental.....	40
Figura 20: Dimensões da chapa de aço AISI 4340.....	41
Figura 21: Corpos de Prova chapa de aço AISI 4340.....	42
Figura 21: Posições dos ensaios de dureza realizados em corpos de prova 16,0 x 50,00 x 122,50 mm.....	43
Figura 23: Representação esquemática dos ensaios de dureza.....	45
Figura 24: Gráfico comparativo entre as durezas encontradas para corpos de prova do Grupo 1 respectivamente: Zona Fundida (ZF), Metal de Base (MB) e Zona Termicamente Afetada (ZTA). Origem da medição x Dureza.....	47
Figura 25: Gráfico comparativo entre as durezas encontradas para corpos de prova do Grupo 2 respectivamente: Zona Fundida (ZF), Metal de Base (MB) e Zona Termicamente Afetada (ZTA). Origem da medição x Dureza.....	49

Figura 26: Gráfico comparativo entre as durezas encontradas para corpos de prova soldados nas condições 1 e 4 respectivamente: Zona Fundida (ZF), Metal de Base (MB) e Zona Termicamente Afetada (ZTA). Origem da medição x Dureza.....50

Figura 27: Gráfico comparativo entre as durezas encontradas para corpos de prova soldados nas condições 2 e 5 respectivamente: Zona Fundida (ZF), Metal de Base (MB) e Zona Termicamente Afetada (ZTA). Origem da medição x Dureza.....51

Figura 28: Gráfico comparativo entre as durezas encontradas para corpos de prova soldados nas condições 3 e 6 respectivamente: Zona Fundida (ZF), Metal de Base (MB) e Zona Termicamente Afetada (ZTA). Origem da medição x Dureza.....52

Figura 29: Gráfico resistência a tração x dureza.....56



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2 PROCESSO DE SOLDAGEM FCAW .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 Soldagem por arame tubular.....</b>	<b>13</b>
2.1.1 Vantagens do processo FCAW.....	16
2.1.2 Desvantagens do processo FCAW .....	16
2.1.3 Técnicas operatórias .....	17
2.1.4 Consumíveis .....	17
2.1.5 Consumível OK TubRod 95k2.....	18
2.1.6 Tipos de transferência metálica.....	19
2.1.6.1 Transferência tipo curto circuito.....	19
2.1.6.2 Transferência globular.....	19
2.1.6.3 Transferência Spray .....	20
2.1.6.4 Arco Pulsado .....	20
<b>2.2 Preparação da junta.....</b>	<b>21</b>
2.2.1 Terminologia .....	21
2.2.2 Elementos do chanfro .....	22
2.2.3 Junta em V .....	23
<b>2.3 Processos de tratamento térmico e alívio de tensões pós soldagem .....</b>	<b>24</b>
2.3.1 Estrutura cristalina.....	24
2.3.2 Tratamento de pré-aquecimento .....	25
2.3.3 Tratamento de pós aquecimento .....	26
<b>3 O AÇO .....</b>	<b>27</b>
3.1 Aço AISI 434.....	28
<b>4 PROPRIEDADE MECÂNICAS .....</b>	<b>30</b>
<b>4.1 Conceitos de resistência dos materiais.....</b>	<b>30</b>
4.1.1 Tensão e deformação.....	31
4.1.2 Ensaio de tração.....	32
4.1.3 Ensaio de dureza.....	33
4.1.4 Ensaio de dureza Rockwell.....	34
<b>5 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>35</b>
<b>5.1 Materiais.....</b>	<b>35</b>
5.1.1 Fonte de energia CV – 420.....	35
5.1.3 Sistema de soldagem mecanizado .....	36
5.1.4 Forno tipo câmara.....	37
5.1.5 Policorte.....	38
5.1.6 Metal de Base .....	38
5.1.7 Metal de adição.....	38
5.1.8 Gás de proteção .....	39
5.1.9 Materiais metalog´raficos.....	39
<b>5.2 Planejamento experimental.....</b>	<b>39</b>
<b>5.3 Preparação dos corpos de prova e realização dos ensaios .....</b>	<b>40</b>
5.3.1 Corte das chapas de aço AISI 4340.....	40
5.3.2 Tratamento térmico .....	40

5.3.3	Confecção dos corpos de prova – Aço AISI 4340.....	41
5.3.4	Ensaio de dureza.....	42
5.3.5	Avaliação dos parâmetros de soldagem.....	42
5.3.6	Testes principais.....	43
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>45</b>
<b>6.1</b>	<b>Resultados obtidos nos ensaios.....</b>	<b>45</b>
6.1.1	Avaliação dos resultados Grupo A.....	46
6.1.2	Avaliação dos resultados Grupo B.....	47
6.1.3	Resultados Grupo A x Grupo B.....	48
6.1.3.1	Condição de soldagem 1 x 4.....	49
6.1.3.2	Condição de soldagem 2 x 5.....	50
6.1.3.3	Condição de soldagem 3 x 6.....	51
<b>6.2</b>	<b>Avaliação da relevância dos resultados .....</b>	<b>52</b>
<b>6.3</b>	<b>Efetividade do consumível .....</b>	<b>53</b>
<b>6.4</b>	<b>Resistência mecânica .....</b>	<b>54</b>
<b>6.5</b>	<b>Implicações da corrente de soldagem .....</b>	<b>56</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>57</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>.....</b>	<b>59</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O aço AISI 4340 é largamente utilizado nas indústrias automotiva e aeronáutica devido a sua elevada resistência mecânica e propriedades favoráveis a tratamentos térmicos. Porém, este material possui elementos de liga e teor de carbono que intensificam a sua suscetibilidade a mudanças de microestrutura tornando-o extremamente transformável, características estas que o fazem um material delicado no que tange processos de fabricação que apliquem grandes cargas térmicas.

Nas indústrias aeronáutica e automotiva este é utilizado para fabricação de componentes sujeitos a altas tensões, pois, possui elevada resistências e esforços e principalmente às solicitações dinâmicas devido à grande tenacidade apresentada por este material (OLIVEIRA; ARAÚJO; SILVA, 2000?).

A soldagem é uma opção bastante relevante no que se diz fabricação e principalmente manutenção de componentes que tem o aço como matéria prima, no entanto esta encontra grandes dificuldades quando se depara com materiais que possuem elementos que tendem sofrer alterações microestruturais quando submetidos a fontes de calor.

O processo de soldagem por arame tubular (*FCAW*) é largamente utilizado por facilitar a mecanização ou automatização também por possibilitar a soldagem da maioria dos metais com qualidade e confiabilidade. No entanto, materiais como o AISI 4340 possuem particularidades que devem ser avaliadas e testadas para a adequação dos parâmetros de soldagem aplicados aos mesmos.

No decorrer deste trabalho será realizada inicialmente uma revisão teórica abordando temas necessários para o entendimento do presente estudo como: soldagem, tratamentos térmicos, aço e suas propriedades e ensaios mecânicos.

Os estudos serão focados nas implicações dos parâmetros de soldagem na dureza do aço AISI 4340. Para esta avaliação será utilizada uma matriz de parâmetros onde será determinada a aplicação ou não de tratamentos térmicos e também a intensidade da corrente de soldagem.

O principal objetivo do presente estudo é conhecer o comportamento deste aço transformável quando submetido a um processo convencional de soldagem, pois, este é aplicado a produtos que geralmente são fabricados por processos de conformação mecânica. Ainda o aço AISI 4340 é utilizado para a fabricação de peças vitais de máquinas e equipamentos que geralmente possuem grandes dimensões e são de difícil fabricação ou manutenção, fazendo da soldagem uma solução versátil para possíveis situações de aplicação.

Espera-se poder avaliar a melhor condição para a aplicação do processo arame tubular na soldagem deste material e também verificar as implicações dos parâmetros de soldagem na dureza do material.

## **2 PROCESSO DE SOLDAGEM FCAW**

Os processos de fabricação têm evoluído no decorrer dos anos visando atender à crescente demanda de um mercado que a cada dia torna-se mais competitivo e exigente. Sendo assim o desenvolvimento de novas alternativas para aumentar a produtividade e a qualidade dos processos produtivos, torna-se imprescindível para o êxito das empresas.

Dentre os processos de fabricação a soldagem por arame tubular têm se mostrado de suma importância para a indústria metal mecânica e vem evoluindo bastante e é hoje objeto de estudo de diversos pesquisadores, pois, possui inúmeras vantagens como: poder ser utilizada na soldagem de todos os metais comerciais e ligas especiais, por possibilitar altas taxas de deposição, dar opção de executar longos cordões em função da alimentação contínua do arame consumível e ainda por ser um processo de fácil automação (BARBEDO, 2011).

O processo FCAW é conhecido por conseguir aliar as melhores qualidades do processo GMAW (MIG/MAG) com as do processo SMAW (eletrodo revestido) (MARQUES et al., 2009).

Os parágrafos a seguir trarão uma breve revisão de bibliografia com intuito de introduzir alguns termos e processos que serão utilizados no decorrer do desenvolvimento da pesquisa.

### **2.1 Soldagem por Arame tubular**

Os arames tubulares com proteção gasosa para soldagem de aços carbono tiveram seu desenvolvimento no início da década de 50, porém, tornaram-se disponíveis comercialmente por volta de 1957. Nas décadas posteriores, especificamente em 60 e 70 foi observado um significativo aumento na aplicação destes consumíveis nos Estados Unidos, e logo depois nos anos 80, este já tinha conseguido grande aceitação pelos japoneses. Em 1991 a empresa Sueca ESAB abriu a sua primeira fábrica de arames tubulares situada em seu complexo industrial no Brasil (FORTES, ARAUJO, 2004).

A participação do processo de soldagem FCAW tem aumentado em todo mundo devido a um declínio do processo eletro revestido (SMAW). Esta situação se dá porque os processos de soldagem a arco elétrico com atmosfera protetora (FCAW e GMAW) têm se desenvolvido bastante nos últimos anos em função de sua facilidade de mecanização, baixo custo e alta produtividade. Outras tecnologias como arco pulsado, alimentadores de arame cada vez mais precisos e a utilização de gases a base de argônio tem colaborado para a

evolução destes processos. Estas características os tornam, processos mais adaptáveis às demandas industriais atuais (VENTRELLA, 2006 apud BARBEDO, 2011).

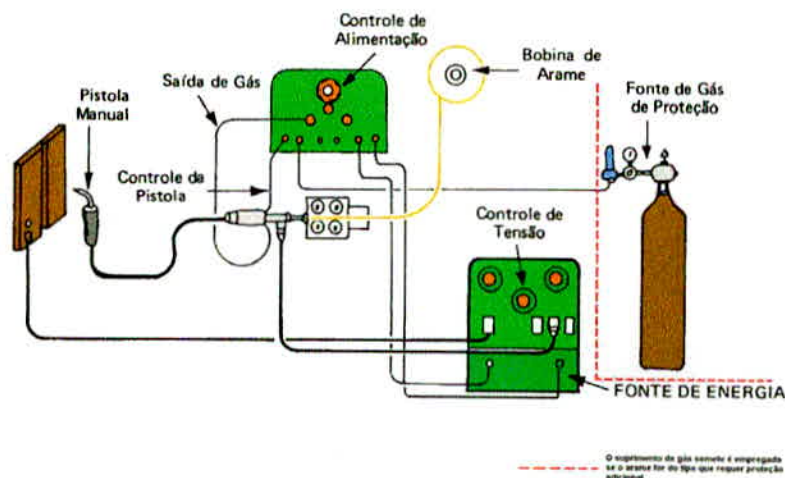
Segundo Barbedo (2011), a soldagem a arco como arame tubular (FCAW) se destaca do processo eletrodo revestido (SMAW) ainda devido ao alto fator de trabalho do soldador, alta taxa de deposição o que resulta em uma elevada produtividade e qualidade dos cordões de solda produzidos.

Segundo Marques et al.(2009), o processo de soldagem a arco com eletrodo tubular (Flux Cored Arc Weld – FCAW) consiste na coalescência dos metais pelo aquecimento gerado por um arco elétrico formado entre o eletrodo tubular contínuo e a peça. Os eletrodos tubulares possuem internamente um fluxo que tem múltiplas funções que são similares as do eletrodo revestido (SMAW), sendo elas: estabilização do arco, ajuste de composição química, proteção entre outras.

O processo de soldagem por arame tubular (FCAW) foi criado visando unir as melhores propriedades dos processos MIG/MAG (GMAW) e eletrodo revestido (SMAW). Estes possuem vantagens particulares como a capacidade do processo GMAW de ser semi-automático ou até mesmo automático, e as propriedades químicas do revestimento do processo SMAW, que podem estabilizar o arco, proteger a poça de fusão e até mesmo adicionar elementos de liga benéficos ao cordão de solda (FBTS, 2000?)

A Figura 01 apresenta a configuração básica do equipamento utilizado no processo de soldagem com arame tubular.

Figura 01: Esquema de montagem do equipamento de soldagem com arame tubular.



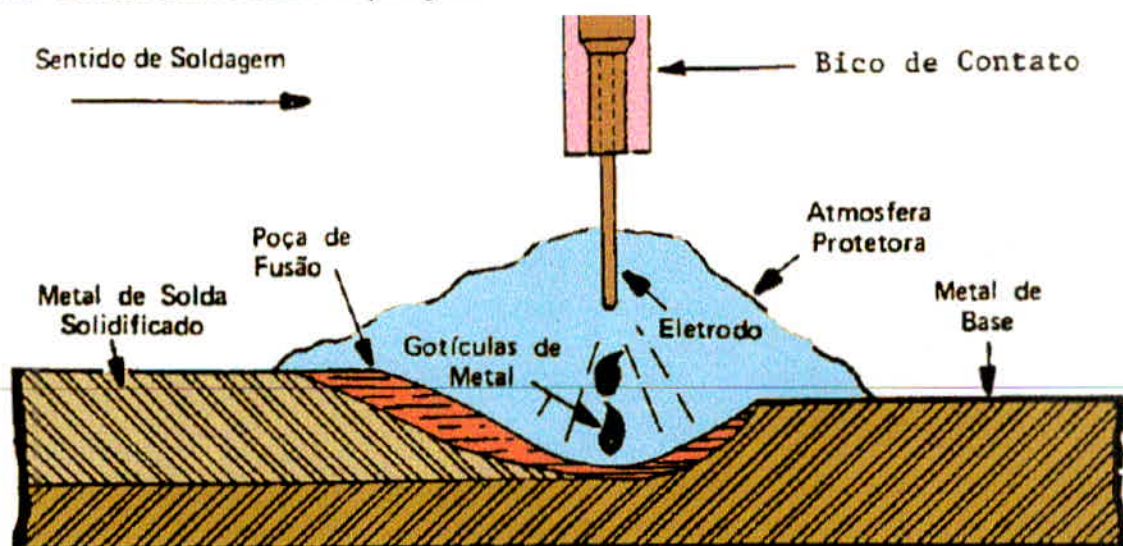
Fonte:(FBTS, 2000?)

Segundo Marques et al. (2009), processo FCAW é caracterizado pela abertura e manutenção do arco elétrico pelo simples contato entre o eletrodo consumível (arame) e o metal de base (peça). O início do processo consiste na aproximação da tocha a um ponto da peça onde a soldagem será realizada, levando ao disparo do gatilho, que por sua vez irá iniciar à alimentação contínua do arame (consumível) com a utilização ou não de um gás de proteção, levando ao processo de energização do circuito de soldagem. Em seguida ocorre a formação da poça de fusão e a movimentação uniforme (velocidade) da tocha ao longo da junta a ser soldada.

Para soldagem utilizando o processo FCAW pode-se optar por consumíveis que utilizam proteção gasosa ou os que possuem auto-proteção. Os arames auto-protegidos dispensam a proteção gasosa, pois, o fluxo contido em seu núcleo contém elementos que criam uma atmosfera que protege a poça de fusão, porém os arames que não possuem estes elementos necessitam de uma proteção gasosa para realizar esta tarefa (FBTS, 2000?).

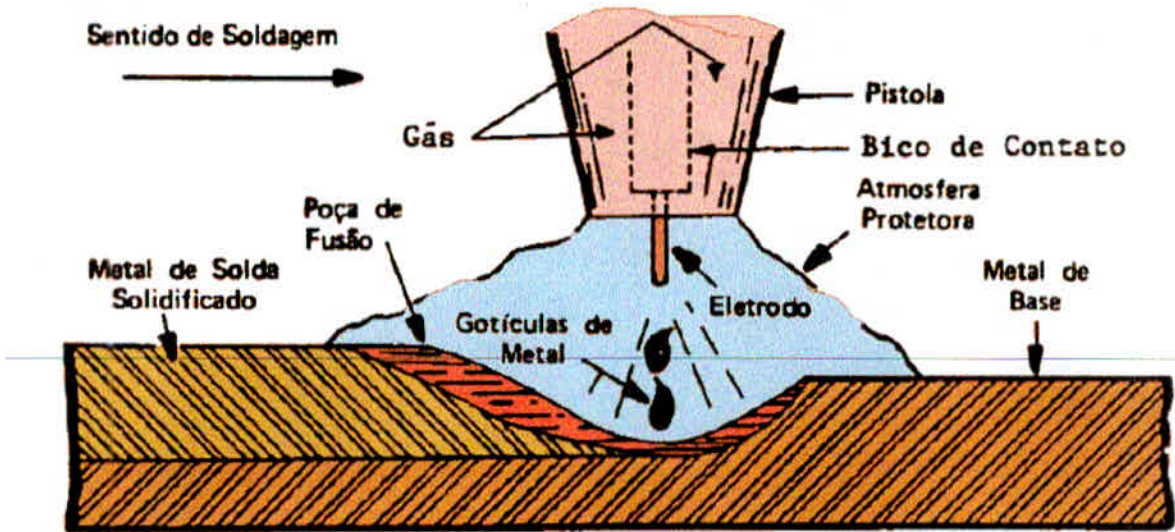
As figuras 2 e 3 mostram respectivamente os processos, utilizando arame auto-protegido e com proteção gasosa.

Figura 02 – Processo arame tubular auto-protegido.



Fonte:(FBTS, 2000?)

Figura 03 – Processo arame tubular com proteção gasosa.



Fonte:(FBTS, 2000?)

### 2.1.1 Vantagens do processo FCAW

De acordo com Quites (2002), as principais vantagens processo FCAW, devem ser avaliadas cuidadosamente, como:

- a) Qualidade da solda depositada;
- a) Alta taxa de deposição de metal fundido;
- b) Alta taxa de produtividade;
- c) Apresenta cordões de boa aparência;
- d) A maioria dos aços podem ser soldados;
- e) É indicado em soldagem de materiais com espessuras elevadas;
- f) Menos susceptível a trincas;
- g) O eletrodo auto-protegido (*innershield*) é mais tolerante a variação do ambiente, ou seja, soldagem ao ar livre.

### 2.1.2 Desvantagens do processo FCAW

Ainda de acordo com Quites (2002), as desvantagens mais comuns no processo FCAW, são:

- a) A soldagem é limitada em locais de difícil acesso, ou seja, devido à necessidade do bocal da tocha de soldagem ficar próximo do metal a ser soldado;



- b) Gera mais fumos em relação ao processo GMAW;
- c) O arame tubular tem custo maior em relação ao GMAW;
- d) Limitado a soldagem de metais ferrosos e liga a base de níquel;
- e) O processo gera escória, necessitando assim uma limpeza adequada para a realização de novos cordões;

### 2.1.3 Técnicas operatórias

Segundo Quites e Dutra(1979), este processo é especialmente indicado para execução de soldas na posição plana, ou horizontal e em juntas de canto. Nos dois casos o eletrodo deve ser conduzido com inclinação de 20 a 30 graus em relação ao plano da seção reta da solda, e este ângulo deve ser medido no sentido de avanço da soldagem. O objetivo desta inclinação é evitar a inclusão de escória no cordão de solda. Para as juntas de canto (solda em filete), existe outra particularidade que tem o objetivo de garantir a penetração da solda, esta é que se deve utilizar um ângulo de 40 a 45 graus em relação ao plano horizontal.

Ainda de acordo com Quites e Dutra (1979), o comprimento do eletrodo deverá ser mantido entre 15 e 20 mm, para arco protegido externamente por gases e maior que 30 mm para arcos auto-protegidos.

O processo arame tubular pode ser utilizado em três variações distintas, sendo as mesmas: alta produção, alta velocidade e soldagem fora de posição. Para o primeiro caso deve-se utilizar elevado "Stickout". A segunda opção é utilizada para soldas de grande extensão com seções médias, particularmente soldas em filete. Já o último caso refere-se à soldagem em diferentes posições com um único conjunto de parâmetros operacionais. (MARQUES et al., 2009, p. 261).

### 2.1.4 Consumíveis

Os consumíveis utilizados na soldagem FCAW são os arames tubulares, os gases de proteção, quando usados, e produtos antirrespingos (MARQUES et al., 2009).

O quadro abaixo mostra a classificação dos arames tubulares de acordo com a AWS (*American Welding Society*).

Quadro 1: Especificações AWS de arames tubulares

Especificação	Consumível
AWS A 5.9	Arames de aço inoxidável com pó metálico interno
AWS A 5.15	Arames para soldagem de ferro fundido
AWS A 5.18	Arames tubulares de aço carbono com pó metálico interno
AWS A 5.20	Arames tubulares de aço carbono com fluxo interno
AWS A 5.21	Arames tubulares para revestimento
AWS A 5.22	Arames tubulares para soldagem de aço inoxidável
AWS A 5.29	Arames de aço de baixa liga com fluxo interno

Fonte: (MARQUES et al., 2009)

Segundo Fortes (2004), os arames tubulares são contínuos e ocos contendo em seu interior fluxos que permitem a soldagem dos mais diversos materiais como aços carbono, aços de alta resistência e baixa liga e aços inoxidáveis e ainda podem ser aplicados na proteção de superfícies sujeitas a abrasão e ao impacto.

Pode-se citar como a principal diferença entre os arames tubulares e os sólidos a presença do fluxo no interior do primeiro. Este que possui propriedades desoxidantes auxiliando na proteção e também podendo inserir elementos de liga ao cordão de solda (BARBEDO, 2011).

Os arames tubulares podem se subdividir em dois grupos:

- a) Arames Tubulares Flux Cored;
- b) Arames Tubulares Metal Cored;

Os consumíveis do tipo Flux Cored, possuem preenchimento constituído por elementos não metálicos que podem possuir duas composições distintas sendo estas classificadas como básica ou rutilica (VOGAS, 2012).

Os arames rutilicos tem como principal elemento em seu núcleo o rutilo ( $TiO_2$ ) e os consumíveis básicos possuem o flureto de cálcio ( $CaF_2$ ) em seu interior (FORTES, ARAUJO, 2004).

Arames do tipo *Metal Cored*, são preenchidos com um tipo de fluxo metálico o que os torna altamente produtivos, possibilitando sua aplicação em processos de alta taxa de deposição (FORTES, ARAUJO, 2004).

#### 2.1.5 Consumível OK TubRod 95K2

De acordo com catálogos do fabricante de eletrodos ESAB, o consumível OK TubRod 95k2 é um arame tubular do tipo “*flux cored*” básico e indicado para aplicações em aços de média e alta resistência mecânica (até 700 Mpa). Podendo ser aplicado também a situações que exijam resistência ao impacto em temperaturas até -50°C, sendo que para os consumíveis de 1,2 mm são indicadas correntes de 150 a 330 A e gás de proteção Argônio contendo de 20 a 25 % de CO<sub>2</sub>.

### 2.1.6 Tipos de transferência metálica

Dentre as principais características de operacionalidade e eficiência do processo de soldagem, estão os métodos de transferência do metal de adição, pois afetam diretamente a habilidade de soldar em várias posições, a profundidade do cordão, a estabilidade da poça de fusão e a quantidade de respingos gerados, (SUBRAMANIAN et al, 1998 apud BARBEDO, 2011).

O modo de transferência metálica depende diretamente dos seguintes itens:

- a) Gás de proteção;
- b) Tipo e intensidade da corrente de soldagem;
- c) Comprimento do arco;
- d) Diâmetro e da composição química do eletrodo ou arame.

(CAMPOS, 2005 apud BARBEDO, 2011 p.).

Os principais modos de transferências metálicas são: curto circuito, globular, spray, e arco pulsado.

#### 2.1.6.1 Transferência do tipo Curto-Circuito

A transferência por curto-circuito é recomendada para soldagem de chapas finas utilizando arames de menor diâmetro e também realização de serviços fora de posição. Este processo consiste em constantes aberturas de arco que provocam separações violentas das gotas, causando um elevado nível de respingo e uma das menores taxas de deposição entre todos os tipos de transferência (FBTS, 2000?).

#### 2.1.6.2 Transferência Globular

A transferência globular tem como característica principal a formação de grandes glóbulos de metal fundido que são transferidos para a poça por força gravitacional. Essa característica limita a aplicação de transferência globular somente em casos de soldagem na posição plana. A transferência globular ocorre em faixas de corrente mais baixa que as da transferência por spray (FBTS, 2000?).

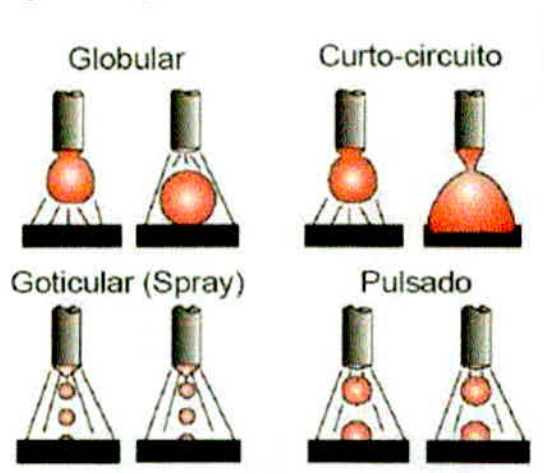
### 2.1.6.3 Transferência Spray

Durante a soldagem por arame tubular quando a corrente atinge um nível denominado corrente de transição começa ocorrer a diminuição das gotas e a taxa de deslocamento destas até o metal de base aumenta causando uma elevação na taxa de deposição. Devido aos valores altos de corrente a transferência por spray não é recomendada para espessuras menores que 6 mm (FORTES; ARAÚJO, 2004)

### 2.1.6.4 Arco Pulsado

A soldagem arco pulsado apresenta características semelhantes às do tipo spray, se diferenciando desta por a transferência ocorrer da ordem de apenas uma gota por pulso. Para atender o quesito de uma gota por pulso o diâmetro da gota deve ser próximo ao do arame eletrodo (BRACARENSE, 2000?).

Figura 04: Tipos de transferência metálica.



Fonte: (BARBEDO, 2011)

## 2.2 Preparação da junta

Para a obtenção de um cordão de solda de boa qualidade, deve-se atentar para a geometria da junta e também para os processos inerentes a sua preparação. Os parágrafos a seguir têm o objetivo de apresentar os principais tipos de junta e também as geometrias possíveis dos chanfros que podem ser aplicados nas mesmas.

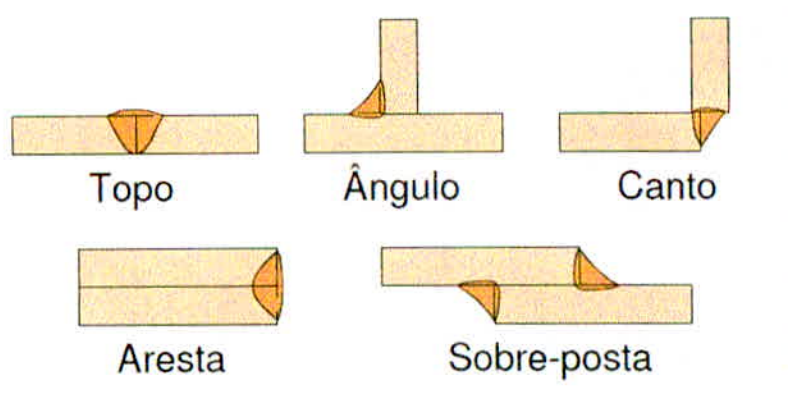
### 2.2.1 Terminologia

O principal objetivo do processo de soldagem é produzir uma junta entre dois elementos sólidos. Esta junta pode configurar-se de diversas maneiras, condicionando diferentemente o processo de soldagem. Por isso, é primordial saber claramente a situação em que a soldagem será executada, pois, a geometria e as dimensões da junta terão ligação direta com estes fatores (QUITES; DUTRA, 1979).

O posicionamento das peças para a união determina os vários tipos de junta. Entretanto, muitas vezes, as dimensões das peças, a facilidade de movê-las exige uma preparação das peças para soldagem, na forma de cortes ou de uma conformação especial da junta (MARQUES et al., 2009).

Os principais tipos de junta utilizados em soldagem são as juntas: topo, ângulo, canto, aresta, sobrepostas. A figura abaixo mostra os principais tipos de junta.

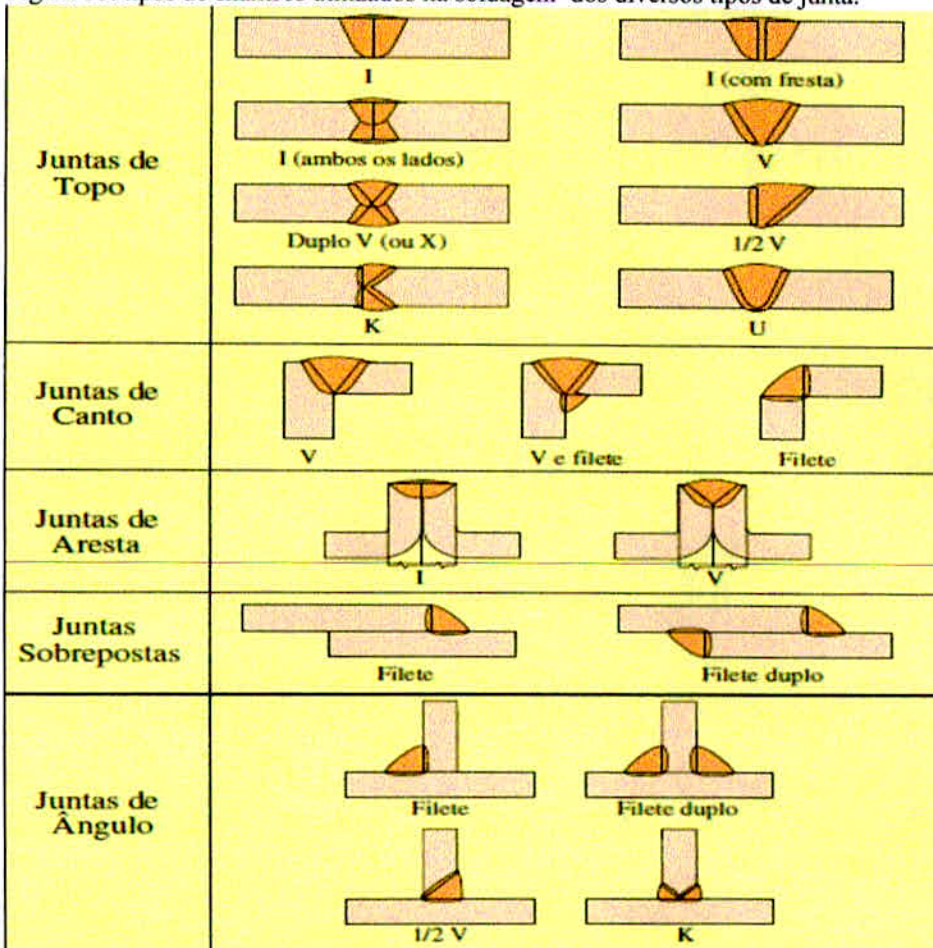
Figura 05 – Tipos de juntas soldadas



Fonte: (MODENESI, 2008)

A formação das juntas pode ser complementada ainda com a utilização dos chanfros. A figura 5 mostra os chanfros mais comuns utilizados em soldagem nos diversos tipos de juntas.

Figura 06: tipos de chanfros utilizados na soldagem dos diversos tipos de junta.



Fonte: (MODENESI,2008)

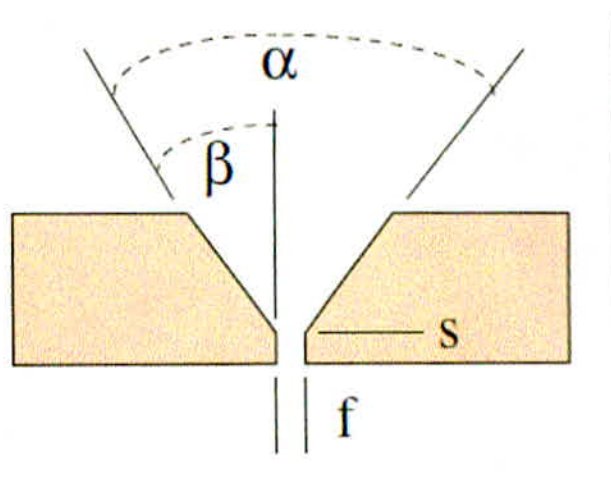
### 2.2.2 Elementos do chanfro

Um chanfro é definido por seus elementos ou características dimensionais. Os principais elementos de um chanfro são.

- Face da raiz ou nariz (s): Parte não chanfrada de um componente da junta;
- Abertura da raiz, folga ou fresta (f): Menor distância entre as peças a soldar;
- Ângulo de abertura da junta ou ângulo de bisel ( $\beta$ ): Ângulo da parte chanfrada de um dos elementos da junta;
- Ângulo de chanfro ( $\alpha$ ): Soma dos ângulos de bisel dos componentes da junta (MARQUES et. al, 2009).

A figura 07 mostra os principais elementos de um chanfro.

Figura 07: elementos do chanfro.



Fonte: (MODENESI, 2008)

Ainda pode-se, utilizar outros componentes como o cobre juntas que tem função de conter o metal fundido durante a execução da junta.

### 2.2.3 Junta em V

Segundo Quites e Dutra (1979), a junta em V simples é indicada para espessuras de até 20 mm onde é necessária uma grande penetração, pois, em espessuras maiores há um grande consumo de metal de adição tornando o processo inviável. O mesmo autor ainda cita que para espessuras superiores a 20 mm é indicada a utilização de preparações dos tipos X (duplo V) ou U.

Devido ao uso de mais altas correntes, o processo de soldagem por eletrodo tubular permite alcançar maiores penetrações do que com eletrodos revestidos normais. Por isso, pode-se preparar as juntas seguindo as recomendações referente aos eletrodos revestidos, porém reduzindo ou eliminando a fresta em caso de bordos retos. (QUITES; DUTRA, 1979 p. 227).

De acordo com o fabricante de eletrodos tubulares BÖHLER WELDING para espessuras de 10 a 20 mm soldadas em posição plana deve-se utilizar chanfros em V com correntes variando de 200 a 350 A e tensões entre 26 e 30 V (BÖHLER WELDING, 2006).

Em seu manual técnico o fabricante de eletrodos ESAB aconselha para a soldagem de aços inoxidáveis por eletrodo revestido a utilização de biseis de  $30^\circ$  com ângulo de chanfro total de  $60^\circ$  quando for feita a opção pela utilização de juntas em V (ESAB, 2000?).

Em seu livro os autores Quites e Dutra, (1979) destacam que para soldagem FCAW utilizando juntas de topo em V é recomendado utilizar um ângulo de bisel de 30° e utilizar os valores de fresta indicados para o processo de soldagem por eletrodo revestido.

Segundo a norma ABNT NBR 7239 para a soldagem manual aplicada a construção naval quando utilizados chanfros em V os mesmos devem possuir ângulos de chanfro de 45° a 60° e estes ainda devem utilizar um abertura de raiz de 0 a 3 mm e um nariz de 0 a 3mm. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1982)

### **2.3 Processos de tratamento térmico e alívio de tensões pós soldagem**

Os processos de fabricação aplicados aos materiais metálicos em sua maioria causam danos a sua estrutura interna, gerando tensões e mudanças estruturais indesejáveis. Uma das melhores maneiras de se controlar as propriedades mecânicas dos materiais é a utilização de processos de tratamento térmico, pois, diferente dos líquidos e dos gases os sólidos acumulam danos em sua estrutura devido a sua história e muitas vezes estes não são perceptíveis em seu exterior (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2011).

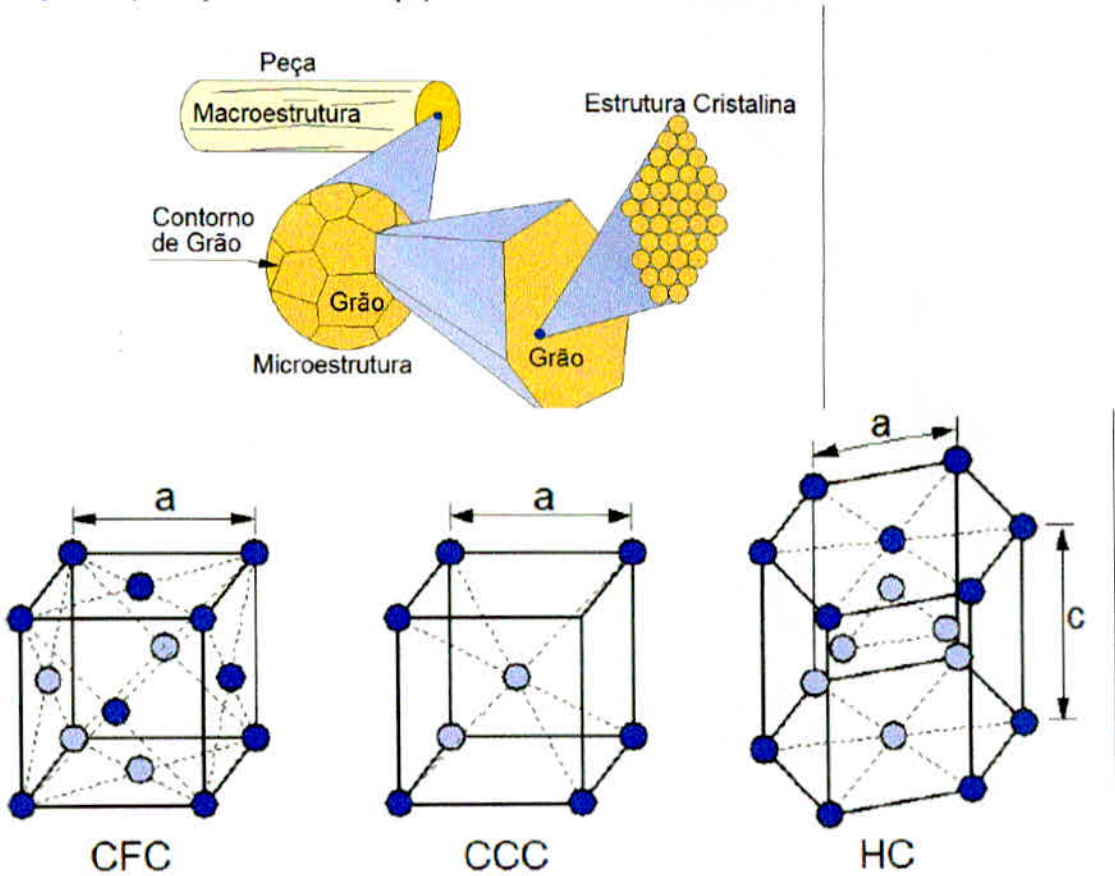
#### **2.3.1 Estrutura Cristalima**

No beneficiamento do aço, o metal líquido se solidifica, quando isto acontece há uma mudança em sua estrutura, pode-se afirmar que este cristalizou. Todos os metais se solidificam desta maneira, formando cristais que se arranjam de maneira ordenada (FORTES, 2004).

Durante a solidificação os metais formam grãos que são separados entre si pelos contornos de grão, estes por sua vez são constituídos por cristais. Nos metais os principais tipos de arranjo cristalino são cúbico de corpo centrado (CCC), cúbico de face centrada (CFC) e hexagonal compacta (HC) (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2011).



Figura 08: Representação esquemática de uma peça metálica e seus níveis estruturais.



Fonte: (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2011)

### 2.3.2 Tratamento de pré-aquecimento

Em sua maioria os materiais metálicos possuem condutividade térmica elevada, esta propriedade os torna sujeitos a sofrer elevações bruscas de temperatura quando submetidos a fontes de calor e em contrapartida quando esta é retirada estes tendem a perder calor tão rapidamente quanto absorveram. Porém, esta propriedade se torna prejudicial quando o material é submetido a soldagem, pois, este resfriamento rápido pode gerar micro estruturas prejudiciais ao material (FORTES, 2004).

O pré-aquecimento é benéfico para a região a ser soldada devido a este maximizar o tempo necessário para o resfriamento, evitando a formação de estruturas de elevada dureza no cordão de solda e também na zona termicamente afetada. Um exemplo deste tipo de estrutura é a martensita que se forma devido ao resfriamento rápido (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2011).

### 2.3.3 Tratamento de pós-aquecimento

O tratamento de pós aquecimento possui a mesma finalidade que o tratamento de pré-aquecimento, a maior diferença entre estes é que o pós-aquecimento consiste em aquecer a junta soldada imediatamente após a soldagem(FORTES, 2004).

Ainda segundo Fortes, 2004 o pós-aquecimento é geralmente empregado em aços altamente transformáveis auxiliando no aumento do tempo requerido para o resfriamento da junta, o que alivia as tensões térmicas geradas durante a soldagem.

### 3 O AÇO

De acordo com Callister (2002), os aços são ligas metálicas, compostas basicamente por ferro e carbono, este aparecendo em porcentagens que variam de 0,008 a 2,14%. Existe também o ferro fundido que é uma liga formada basicamente por ferro e carbono, porém o último em teores de 2,14 a 6,67%. É bastante comum que estes venham acrescidos de outras ligas que tem a função de melhorar as propriedades destes materiais.

A obtenção destes materiais é feita por meio de processos siderúrgicos que basicamente são a redução, refino e por último a conformação mecânica. Na redução o minério de ferro é reduzido a ferro gusa (redução em alto forno) ou ferro esponja (redução direta). O processo de refino consiste na transformação dos produtos da redução do minério em aço, adequando sua composição química ao ideal para uso nas mais diversas aplicações. Por último e não menos importante ocorre à conformação, que consiste na transformação mecânica dos aços em produtos que possam ser utilizados pela indústria e envolve, de forma geral, a laminação, trefilação e o forjamento (SCHEID, 2010).

As figuras 7 e 8 representam respectivamente o esquema de funcionamento de um alto forno e uma imagem real de um destes equipamentos.

Figura 09: Representação esquemática do processo de redução

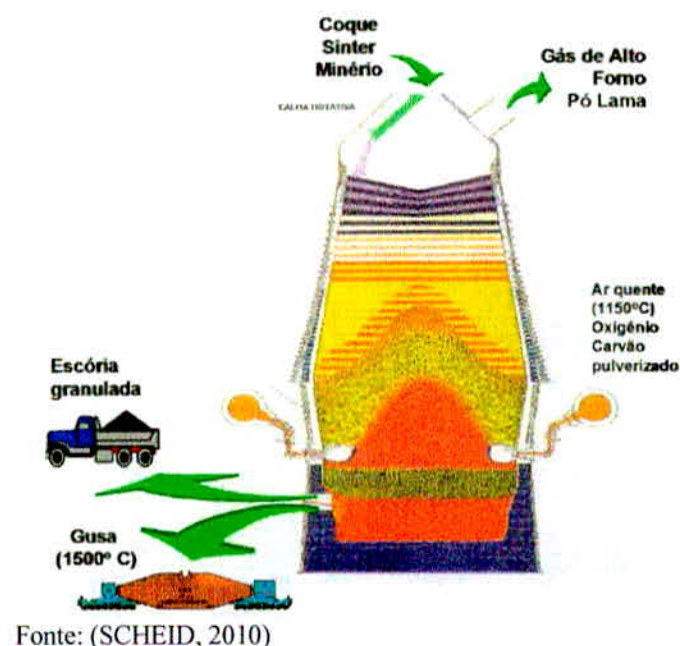


Figura 10: Auto Forno



Fonte: (SCHEID, 2010)

Os aços podem ser classificados de diversas maneiras, porém, a mais utilizada é que leva em consideração sua composição química, de acordo com o sistema de designação SAE-AISI (SAE – Society of Automotive Engineers, AISI – American Iron and Steel Institute). Tomando como referência estas duas organizações os aços se organizam em quatro subcategorias.

- a) Aços Carbono;
- b) Aços Liga ou de Construção Mecânica (Baixa e Média Liga);
- c) Aços Inoxidáveis;
- d) Aços Ferramenta (Alta Liga) (SCHEID, 2010).

### 3.1 Aço AISI 4340

Dentre os aços de baixa liga o material AISI 4340 tem sido empregado em larga escala para a fabricação de componentes estruturais solicitados por esforços, devido à alta resistência mecânica que este proporciona, podendo resistir a diversas solicitações estáticas, boa resistência a fadiga, podendo trabalhar em solicitações dinâmicas, boa resistência ao desgaste, atendendo ao rigoroso e crescente aumento das exigências para aplicações na engenharia (VIEIRA, 2012).

Segundo Torres e Voorwald (2002 apud VIEIRA, 2012, o material AISI 4340 contém níquel, cromo e molibdênio, pode ser tratado termicamente e é largamente utilizado na indústria aeronáutica e automotiva para fabricação de componentes estruturais em função de suas propriedades mecânicas, possuindo alta resistência à ruptura e dureza. Apresenta uma boa resistência à fadiga e bom desempenho quando submetido a carregamentos cíclicos. Entretanto este material apresenta baixa resistência à corrosão necessitando de tratamentos superficiais posteriores. Por esta razão este aço é amplamente utilizado na indústria automotiva e aeronáutica.

De acordo com Villares (2008), este material é largamente aplicado para a fabricação de virabrequins para caminhões, tratores, aviões; aplicações navais, fabricação de bielas, eixos submetidos a elevadas tensões e também na confecção de peças de grandes seções submetidas a elevados esforços.

Este material possui elementos de liga com valores aproximados aos demonstrados no quadro abaixo.

Quadro 2 – Composição química do aço AISI 4340

<b>C%</b>	<b>Si%</b>	<b>Mn%</b>	<b>P%</b>	<b>S%</b>	<b>Cr%</b>	<b>Mo%</b>	<b>Ni%</b>
0,37 - 0,43	0,15 - 0,35	0,60 - 0,80	≤ 0,025	≤ 0,025	0,70 - 0,90	0,20 - 0,30	1,65 - 2,00

Fonte: (SCHMOLZ, 2010).

Ainda de acordo com Schmolz (2010), este material é indicado para aplicações onde ocorrem solicitações dinâmicas e é excelente para trabalhos aonde ocorrem carregamentos cíclicos.

## **4 PROPRIEDADES MECÂNICAS**

As propriedades mecânicas constituem os característicos mais importantes dos metais para sua aplicação no campo da engenharia, visto que o projeto e a execução das estruturas metálicas, que sejam elas móveis ou estáticas e até mesmo das ferramentas metálicas dependem diretamente do conhecimento destas características (CHIAVERINI, 1986).

As propriedades mecânicas definem o comportamento de um material quando este é sujeito a esforços mecânicos e correspondem a capacidade de transmitir e resistir aos esforços que lhe são aplicados, sem romper ou sem que se verifiquem deformações incontroláveis (CHIAVERINI, 1986).

Dentre os métodos de se conhecer as propriedades mecânicas dos materiais, o ensaio de tração se destaca pela facilidade na execução e na reprodução posterior dos resultados tornando este um dos mais importantes entre os ensaios mecânicos (SOUZA, 1982).

Este ensaio é geralmente realizado em corpos de prova de formas padronizadas por norma, com o objetivo de possibilitar a reprodução posterior deste ensaio. Sendo que a precisão do ensaio de tração depende diretamente do correto funcionamento dos equipamentos utilizados na execução do ensaio (SOUZA, 1982).

No Brasil a norma que regula a confecção dos corpos de prova e a execução do ensaio de tração é a ABNT NBR 6152: 2002 esta norma rege os métodos aplicados para ensaios realizados a temperatura ambiente.

### **4.1 Conceitos de resistência dos materiais**

Segundo Hibbeler (2004), a resistência dos materiais é a área da mecânica que tem como objeto de estudo o comportamento dos corpos deformáveis quando submetidos a esforços externos e internos. Esta ciência juntamente com a estática é o fundamento de qualquer projeto de engenharia que visa à fabricação de estruturas móveis ou estáticas.

Segundo Botelho (2008) os primeiros relatos do estudo sistemático do comportamento mecânico dos materiais foram atribuídos a Galileu Galillei, porém existem ainda indícios históricos que mostram que mesmo antes esta ciência já dava seus primeiros passos com os egípcios por volta dos anos 2.000 a.C.

De acordo com Hibbeler (2004), os estudos que Galileu desenvolveu por volta do século XVII, foram voltados para o comportamento mecânico de hastes e vigas de materiais diferentes quando submetidas a esforços. Porém, maior evolução do conhecimento das

propriedades dos materiais veio somente no século XVII quando os notáveis como Saint-Venant, Poisson, Navier e Lamé.

#### 4.1.1 Tensão e Deformação

Segundo Souza (1982), a tensão se define como a medida da resistência interna por unidade de área de um corpo solicitado por esforços externos. O cálculo da mesma é efetuado dividindo a força aplicada pela área da seção em questão.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Quando um corpo é submetido a um esforço, este tende a ter mudanças em sua forma e tamanho. Estas mudanças são denominadas deformações, podendo ser visíveis a condições normais ou quase imperceptíveis sem o uso de sofisticados equipamentos de medição. A deformação normal sofrida por um corpo pode ser medida utilizando as equações abaixo (HIBBELER, 2004).

$$\varepsilon_{méd} = \frac{\Delta s' - \Delta s}{\Delta s}$$

$$\varepsilon = \lim_{B \rightarrow A} \frac{\Delta s' - \Delta s}{\Delta s}$$

$$\Delta s' = (1 + \varepsilon)\Delta s$$

Os valores de  $\varepsilon$  serão positivos quando o esforço tender a alongar o corpo (tração), e negativos quando o esforço tender a contrair o mesmo (compressão). Em geral adota-se como deformação nominal a divisão entre o comprimento de referência  $\delta$  e o comprimento inicial  $L_0$  (SOUZA, 1982).

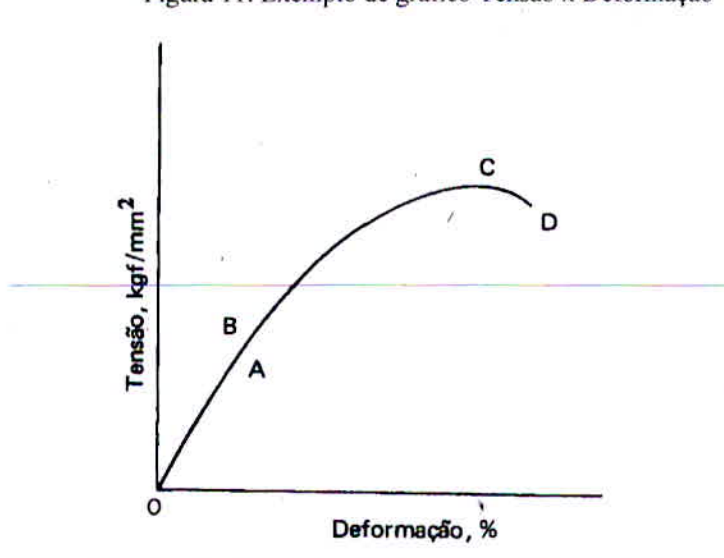
$$\varepsilon = \frac{\delta}{L_0}$$

#### 4.1.2 Ensaio de tração

O ensaio de tração é um dos métodos utilizados para a determinação das propriedades mecânicas dos materiais. Este método é amplamente utilizado devido a sua facilidade de execução e reprodução dos resultados o torna um dos mais versáteis entre os ensaios mecânicos (SOUZA, 1982).

Este ensaio consiste na aplicação de um esforço utilizando um corpo de prova padronizado que se deformará reagindo à força aplicada. Uma das maneiras de quantificar e avaliar o comportamento do material é a utilização do gráfico, Tensão x Deformação.

Figura 11: Exemplo de gráfico Tensão x Deformação

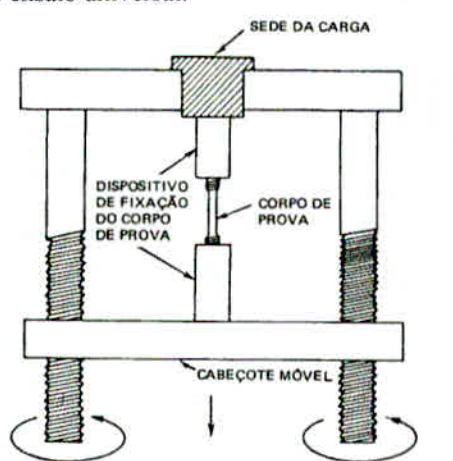


Fonte:( CHIAVERINI, 1986)

Para a realização dos ensaios de tração são utilizadas às denominadas máquinas de ensaio universal, conforme a representação esquemática da figura abaixo.



Figura 12: Esquema de montagem de máquina de ensaio universal.



Fonte: (CHIAVERINI, 1986).

Quando um material é submetido ao esforço de tração situado dentro de limites que são determinados pelas propriedades mecânicas de cada material, estes tendem se deformar proporcionalmente a força aplicada e de maneira inversamente proporcional a sua área de seção transversal. Durante este intervalo pode-se caracterizar o comportamento através da lei de Hooke e também é possível definir outra grandeza inerente a estas propriedades, o módulo Young (CHIAVERINI, 1986).

$$e = \frac{Pl}{AE}$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

#### 4.1.3 Ensaio de dureza

De acordo com Chiaverini (1986), a dureza possui diversas definições e interpretações como: resistência a penetração, absorção de energia sob cargas dinâmicas, resistência a ação do risco, resistência a abrasão e resistência ao corte. Porém o conceito de resistência a penetração se torna fundamental para a compreensão desta propriedade.

A dureza de um material pode ser medida através da impressão de um penetrador que exerce esforço de compressão sobre este, as principais escalas utilizam a profundidade ou a área de impressão de um penetrador que pode ser metálico ou de diamante. Após a obtenção dos valores, estes são comparados com tabelas que padronizam as diversas escalas destas propriedades, como Brinell, Vickers, Knoop e Rockwell (FORTES, 2004).

O equipamento utilizado para a realização do ensaio de dureza é denominado durômetro.

Figura 13: Durômetro



Fonte: (UFJF, 2014)

#### 4.1.4 Ensaio de dureza Rockwell

É atualmente o processo mais utilizado, devido a sua versatilidade, facilidade na execução, capacidade de detecção, isenção de erros e também devido a pequena impressão o que torna possível a aplicação deste em peças acabadas (CHIAVERINI, 1986).

Para o ensaio de dureza Rockwell, pode-se utilizar penetrador esférico de aço ou cônico de diamante, sendo que o segundo tem ângulo de conicidade de  $120^\circ$ . Este processo é subdividido em escalas, sendo que as mais utilizadas para aço são as escalas B e C (SOUZA, 1982).

De acordo com Souza (1982), a escala de dureza Rockwell possibilita agilidade na leitura e interpretação dos resultados, devido a esta utilizar a profundidade atingida pelo penetrador como referência para a medição de dureza. O funcionamento desta consiste na aplicação de uma carga inicial (maior) e depois uma carga final menor que a primeira, fazendo que a deformação elástica do material seja descontada da medição.

## **5 MATERIAIS E MÉTODOS**

No desenvolvimento deste capítulo, serão detalhados os equipamentos, materiais, acessórios, técnicas e parametrização utilizados para o desenvolvimento do presente estudo. FCAW.

### **5.1 Materiais e equipamentos**

Desde os testes preliminares, preparação dos corpos de prova, soldagem e realização a dos testes finais foram utilizados vários equipamentos e materiais que serão descritos no decorrer deste subitem.

#### **5.1.1 Fontes de energia CV- 420**

Para a realização da soldagem foi utilizada a fonte de soldagem Lincoln Eletric, modelo Idealarc CV- 420, alimentação 220/380/440V do tipo transformador-retificador, trifásico, com características de tensão constante e CC (corrente contínua).

#### **5.1.2 Alimentador de arame LF-33**

O sistema de alimentação externo utilizado para a realização dos testes de soldagem, foi o modelo F-33 da Lincoln Eletric, com velocidade de alimentação de arame variando de 1,0 à 20 m/min utilizando arames de 0,8 à 1,6mm.

Figura 14: Fonte de energia CV-420 e sistema de alimentação de arame LF-33.

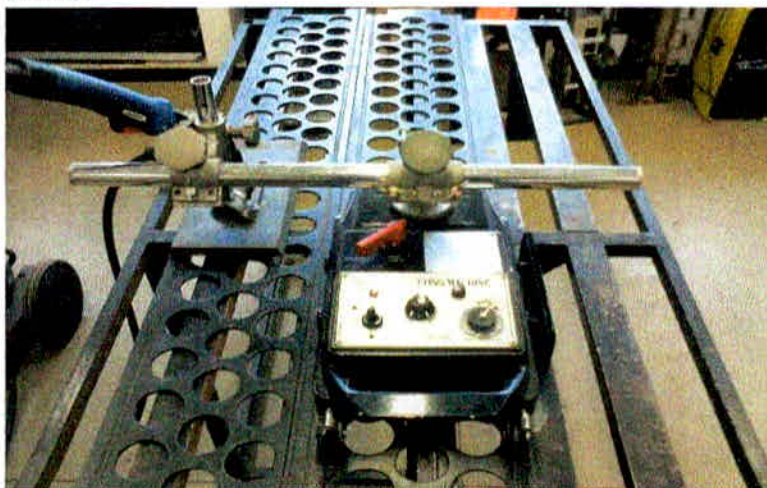


Fonte: Autor

### 5.1.3 Sistema de soldagem mecanizado

Foi utilizado para a execução dos cordões de solda um sistema mecanizado de deslocamento da tocha (tartaruga), modelo SB1-30, alimentação AC 220 V 50/60 Hz, e com velocidade podendo variar de 50 à 3800 mm/min. Este sistema foi aplicado devido a possibilidade de controlar e manter as características de soldagem ao longo de todo o cordão. A figura 12 apresenta a mesa de soldagem com o sistema mecanizado de deslocamento da tocha. A figura 14 ilustra de forma geral a bancada de testes utilizada para a realização dos testes de soldagem.

Figura 15: Mesa de soldagem mecanizada com sistema de deslocamento da tocha.



Fonte: Autor

Figura 16: Bancada de ensaios de soldagem.



Fonte: Autor

- 1) fonte de energia;
- 2) gás de proteção;
- 3) tocha;
- 4) corpo de prova;
- 5) carro tartaruga.

#### 5.1.4 Forno Tipo Câmara

Para a realização dos tratamentos térmicos (normalização, pré-aquecimento e pós-aquecimento) foi utilizado um forno elétrico tipo Câmara, BRASIMET, modelo K-400, com variação de temperatura de 0 à 1300°C.

Figura 17: Forno tipo Câmara utilizado para os tratamentos térmicos.



Fonte: Autor

#### 5.1.5 Serra de Fita

Para confecção dos corpos de prova, foi utilizado uma serra de fita, marca MANROD, modelo MR-122, variação de velocidade de 34 à 98m/min, por intermédio de polias com correia em V com alimentação de 220/380V.

Figura 18: Serra de Fita utilizada para confeccionar os corpos de prova.



Fonte: Autor

#### 5.1.6 Metal de Base dos corpos de prova

O metal de base utilizado na pesquisa, foi o aço AISI 4340 forjado com espessura de 5/8” nas dimensões de 50 x 120 mm, cuja composição química especificada está apresentada no quadro03.

Quadro 03 – Composição química do aço AISI 4340

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Mo%	Ni%
0,37 - 0,43	0,15 - 0,35	0,60 - 0,80	≤ 0,025	≤ 0,025	0,70 - 0,90	0,20 - 0,30	1,65 - 2,00

Fonte: (SCHMOLZ, 2014)

#### 5.1.7 - Metal de adição

No desenvolvimento da pesquisa foi utilizado como metal de adição o consumível “Tubrod 95 K2 (Flux Cored) - ESAB” com diâmetro de 1,2 mm. Os quadros 04 e 05 apresentam respectivamente a sua composição química e as suas propriedades mecânicas.

Quadro 04: Composição química do arame (%).

Material	C (%)	Si (%)	Mn (%)	Ni (%)	Mo (%)
Tubrod 95 K2	0,05	0,50	1,50	1,65	0,10

Fonte: ESAB

Quadro 05: Propriedades mecânicas.

Material	L.R (MPa)	L.E (MPa)	Alongamento (%)	Charpy-V/ [J] -40°C
Tubrod 95 K2	720	670	20	40

Fonte: ESAB

### 5.1.8 Gás de Proteção

Durante a soldagem dos corpos de prova foi utilizada uma mistura gasosa contendo 75% de argônio (Ar) e 25% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) conforme especificado pelo fabricante (ESAB).

### 5.1.9 Materiais metalográficos

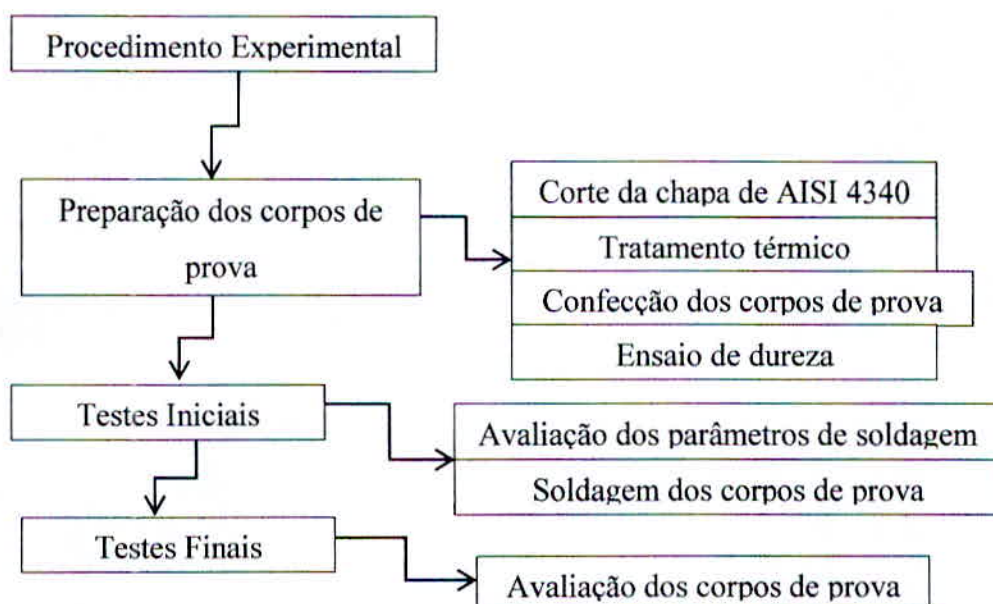
Para a preparação metalográfica dos corpos de prova foram utilizados os itens descritos abaixo.

- a) Alumina 1 $\mu$  e 0,3  $\mu$ .
- b) Lixas d'água n.ºs. 220, 320, 400, 600 e 1200 gr;
- c) Reagente químico - Nital 5%

## 5.2 Planejamento experimental

O desenvolvimento experimental deste trabalho foi dividido em cinco etapas. O fluxograma apresentado na figura 18 esquematiza a sequência metodológica utilizada, correlacionando cada etapa com a sequência das atividades experimentais a serem desenvolvidas.

Figura 19: Fluxograma experimental



Fonte: Autor

### 5.3 Preparação dos corpos de prova e realização dos ensaios

Nesta etapa foi realizada toda a preparação e confecção dos corpos de prova utilizados e também ocorreu a realização dos ensaios.

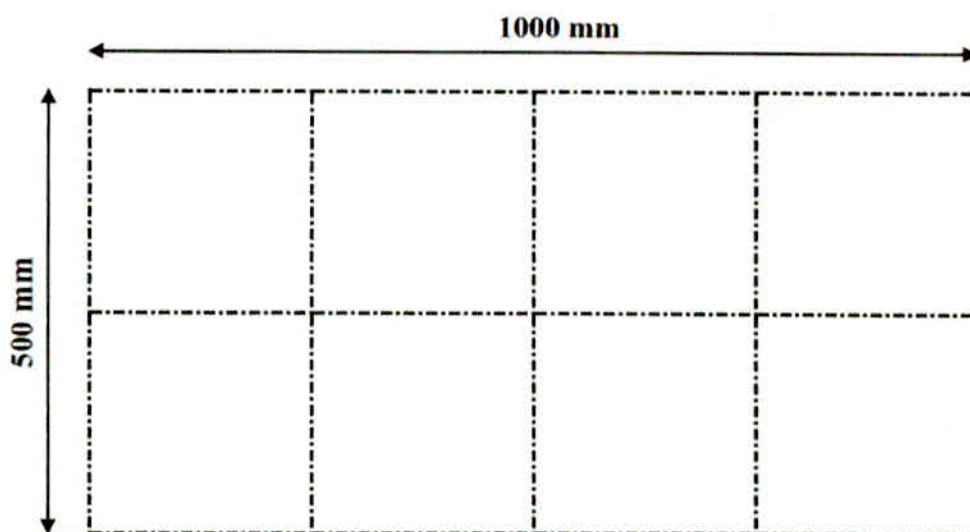
#### 5.3.1 Corte das chapas de aço AISI 4340

O material utilizado para os testes foi, recebido na condição forjado na forma de chapa com espessura de 5/8" (16 mm). Devido suas dimensões foi necessário preparar o metal de base com o auxílio de um maçarico oxi-corte, de forma a facilitar a fabricação dos corpos de prova.

A chapa de aço AISI 4340, foi cortada em 8 partes, nas dimensões aproximadamente de 16,0 x 250 x 250 mm cada conforme apresenta a figura 19.



Figura 20: Dimensões da chapa de aço AISI 4340



Fonte: Autor

### 5.3.2 Tratamento térmico

Devido a altas temperaturas geradas na chapa durante os cortes com o processo oxidecorte e a alta temperabilidade do aço AISI 4340, foi necessário realizar tratamento térmico de normalização após o corte das mesmas.

Este procedimento teve como objetivo garantir a uniformidade microestrutural dos corpos de prova e evitar a presença de outras fases como martensita e ou bainita, que poderiam ter sido geradas durante o processo de corte.

Segundo Chiaverini (1986), a normalização possui os mesmos objetivos do recozimento, ou seja, gerar uma estrutura de grãos mais homogêneas e livre de tensões residuais, diferenciando apenas o tipo de resfriamento um pouco mais rápido ou seja resfriamento ao ar livre.

A normalização foi realizada da seguinte forma: a chapa cortada com as dimensões aproximadas de 16,0 x 250 x 250 mm, foram aquecidas lentamente dentro do forno até a uma temperatura de 910°C e mantida a esta temperatura por 60 minutos (período de encharque). Após o período de 60 minutos as mesmas foram retiradas do forno e colocadas para resfriar ao ar livre.

### 5.3.3 Confeção dos corpos de prova - Aço AISI 4340

Os corpos de prova para a realização da soldagem foram preparados através do corte das chapas de 250 x 250 mm em 10 corpos de prova, conforme esquema da figura 19. A dimensão do corpo de prova para soldagem foi de 16,0 x 50,0 x 122,5 mm. Em seguida, a superfície do corpo de prova a ser soldado foi fresada, em uma fresadora ferramenteira, para a retirada da carepa, dos óxidos e das rebarbas dos cortes.

Figura 21: Corpos de prova chapa de aço AISI 4340



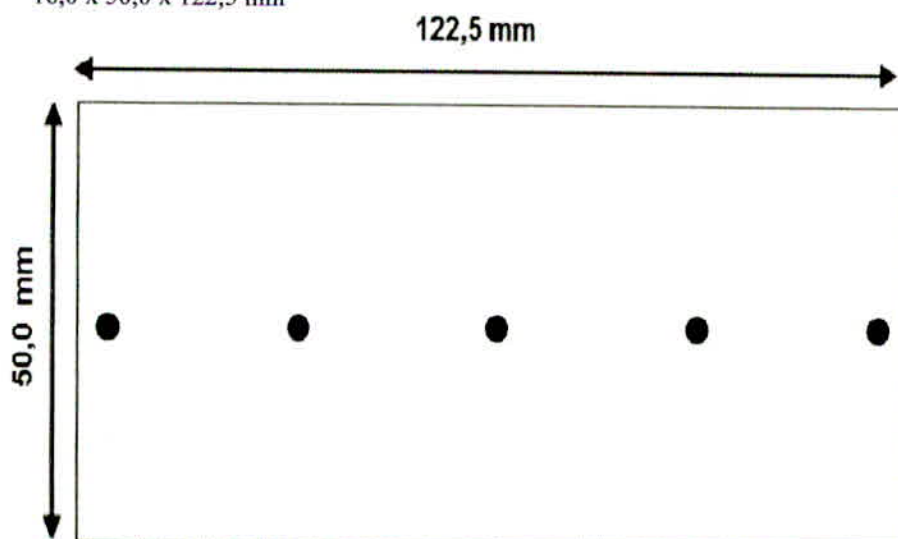
Fonte: Autor

#### 5.3.4 Ensaio de dureza

Após a limpeza dos corpos de prova, estes foram submetidos a ensaio de dureza para verificar a eficiência do tratamento térmico.

Para esta análise foram realizados cinco testes de dureza ao longo dos corpos de prova, conforme esquema apresentado na figura 21.

Figura 22: Posições dos ensaios de dureza realizados em corpos de prova 16,0 x 50,0 x 122,5 mm



Fonte: Autor

### 5.3.5 Avaliação dos parâmetros de soldagem

Para a definição dos parâmetros de soldagem, foram realizados cordões de solda sob chapas (beadonplate -BOP), utilizando o consumível Tubrod 95 K2 (*Flux Cored* - ESAB) no diâmetro de 1,2 mm.

O objetivo dos testes iniciais foi determinar as condições operacionais de soldagem que minimizassem a instabilidade do arco produzindo assim uma boa penetração combinada a um cordão de solda de alta qualidade o quadro XX demonstra os parâmetros utilizados nos testes preliminares.

Quadro06: Parâmetros utilizados nos testes iniciais realizados com o consumível: Tuborod 95 K2 (Flux Cored - ESAB) em chapas de aço AISI 4340, com e sem o pré-aquecimento.

Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade soldagem (mm/min)
30	200	0,24
30	200	0,32
27,5	260	0,32

Fonte: Autor

A vazão do gás de proteção utilizada foi de acordo com os parâmetros recomendados pelo fabricante.

Para este trabalho os parâmetros operacionais fixos utilizados para execução dos testes estão mostrados no quadro 07.

Quadro 07: Parâmetros fixos utilizados nos testes iniciais de soldagem para Tubrod 95 K2 (Flux Cored - ESAB) no aço 4340.

Item	Valores de referência
Gás de proteção	75% Ar + 25% CO <sub>2</sub>
Vazão do gás	18 l/min
Distância bico/peça	15 mm
Tipo de Corrente	Contínua (CC <sup>+</sup> )

Fonte: Autor

### 5.3.6 Testes principais

Para a realização dos ensaios foram confeccionados seis corpos de prova do material AISI 4340, sendo que os parâmetros de soldagem utilizados são dados no quadro 08. Visando avaliar a o comportamento do material quando submetido a diferentes parâmetros e condições de soldagem, estes foram divididos em dois grupos, um destes foi soldado com corrente de 260 A e o outro de 280 A e também foram realizadas variações nas condições de operação conforme o quadro 09.

Após a soldagem foram realizados testes de dureza em três regiões distintas, conforme quadro 10.

Quadro08: Variáveis de entrada e seus respectivos níveis para o eletrodo básico.

Variáveis	Nível (-)	Nível (+)	Parâmetros Fixos		
			Tensão (volts)	Velocidade (mm/min)	Stick-out (mm)
Corrente (ampere)	260	280	27,5	320	15
Temp. Pré-aquecimento (°C)	300		-	-	-
Temp. Pós-aquecimento (°C)	550		-	-	-

Fonte: Autor

Quadro 09: Matriz da Experimentação.

Corpo de Prova	Condições	Variáveis de Entrada Com as Respectivas Condições		
		Corrente (A)	Temp.Pré (°C)	Temp. Pós (°C)
1.1	1	260	-	-
1.7	2	260	300	-
1.3	3	260	300	550
1.2	4	280	-	-
1.4	5	280	300	-
1.6	6	280	300	550

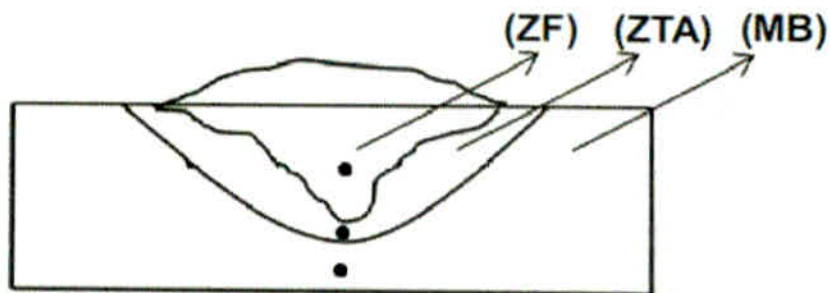
Fonte:Autor

Quadro 10: Fatores a serem observados em cada uma das condições experimentais.

Respostas	Unidade
1) Dureza na Zona Termicamente Afetada (ZTA)	Rockwell C (HRC)
2) Dureza na Zona Fundida (ZF)	Rockwell C (HRC)
3) Dureza no Metal de Base (MB)	Rockwell C (HRC)

Fonte: Autor

Figura 23 - Representação esquemática dos ensaios de dureza.



Fonte: Autor

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No decorrer deste capítulo serão realizadas a apresentação e a discussão dos resultados obtidos nos ensaios, visando demonstrar os efeitos dos parâmetros nas propriedades do material.

O objetivo principal é demonstrar as mudanças de dureza sofridas pelo material de acordo com as condições de soldagem e região onde está foi avaliada. Ainda neste capítulo será feita uma estimativa da resistência à tração do material utilizando seu valor de dureza como referência.

O conhecimento das propriedades adquiridas após a soldagem é de suma importância para conhecer as limitações do material em suas possíveis aplicações posteriores. Levando em consideração que o Aço AISI 4340 ainda tem processos de soldagem utilizando métodos convencionais como um paradigma a ser quebrado, esta avaliação possui relevância significativa.

### 6.1 Resultados obtidos nos ensaios

Após a realização do ensaio de ROCKWELL utilizando a escala C, foram obtidos os valores demonstrados na tabela 1.

Tabela 1: Valores de dureza encontrados nos ensaios.

Corpo de Prova	Condições	Valores de Dureza Rockwel C		
		Zona Fundida (HRC)	ZTA (HRC)	Base (HRC)
1.1	1	20	53	26
1.7	2	15	34	22
1.3	3	13	37	22
1.2	4	30	55	29
1.4	5	20	39	25
1.6	6	-	36	22

Fonte: Autor

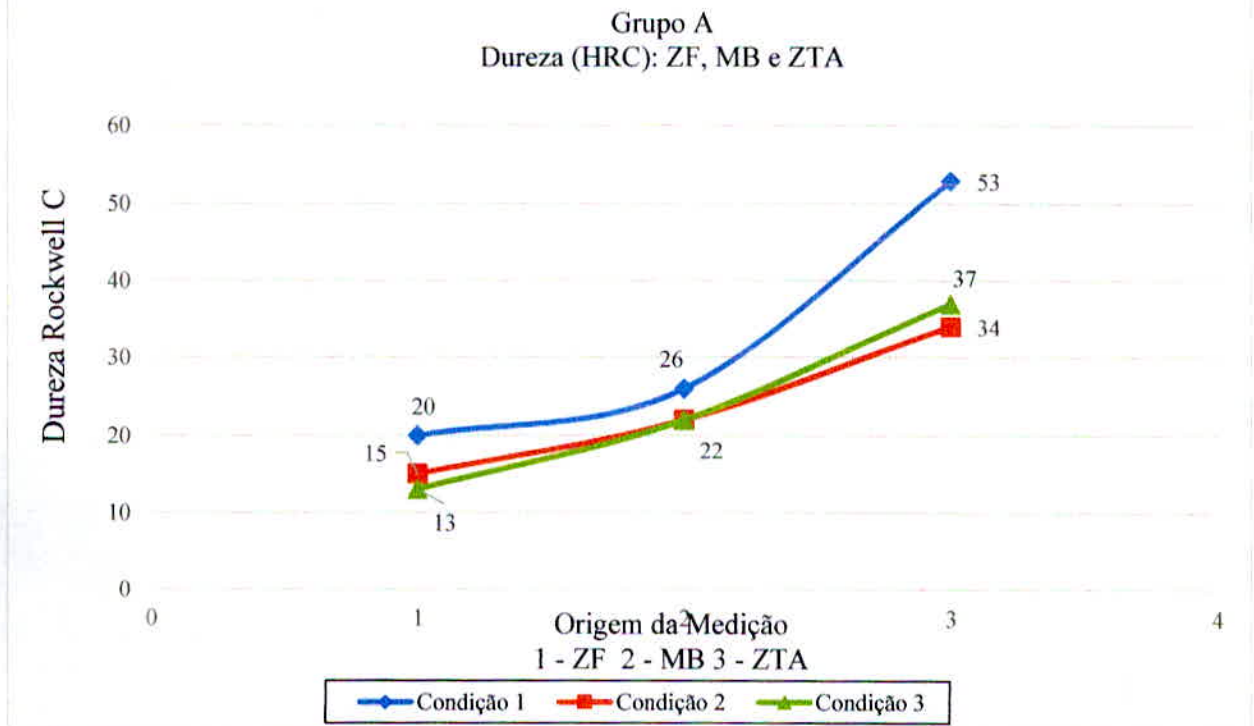
Com a finalidade de facilitar a discussão dos resultados, as peças soldadas serão divididas em dois grupos de acordo com a corrente de soldagem aplicada. Ficando então como Grupo A as peças soldadas a 260 A e Grupo B as peças soldadas a 280A. Estas serão avaliadas em grupos e também separadamente de acordo com as condições de soldagem com o objetivo de se comparar as duas situações distintas de corrente e também a eficácia dos processos de pré e pós aquecimento.

### 6.1.1 Avaliação dos resultados Grupo A

Os resultados obtidos nos ensaios realizados nas peças do Grupo A podem ser vistos na figura 23.

É visível que o material sofreu variações bruscas de dureza nas zonas definidas para a medição, sendo que na zona termicamente afetada ocorreram os maiores valores. Esta situação é bastante comum para qualquer tipo de aço, porém, as maiores variações apresentadas ocorrem devido o aço AISI 4340 ser um material transformável, cujos elementos de liga propiciam as mudanças microestruturais.

Figura 24: Gráfico comparativo entre as durezas encontradas para corpos de prova do Grupo 1 respectivamente: Zona fundida (ZF), Metal de base (MB) e Zona termicamente afetada (ZTA). Origem da Medição X Dureza.



O primeiro ponto relevante é observar que o corpo de prova soldado na condição 1, apresenta maiores valores de dureza nas três regiões avaliadas, fica visível que a falta de processos de atenuação das tensões térmicas geradas afeta diretamente na propriedade avaliada. Outro fator a ser observado é que as peças soldadas nas condições 2 e 3 não apresentaram variações significativas entre as medições principalmente na ZF e MB.

A dureza na ZTA das três peças, sofreu uma elevação considerável quando comparadas com os valores do metal de base sendo que nas condições 2 e 3 esta variação ficou entre 12 e 15 HRC, já a peça soldada na condição 1 apresentou variação de consideráveis 27 HRC. A maior variação apresentada pela amostra soldada na condição 1 deve-se a ausência de tratamentos pré e pós soldagem, fazendo com que provavelmente houvesse uma brusca mudança de microestrutura na peça, assim demonstrando a aptidão natural deste material a mudanças microestruturais.

Devido a esta dureza de 55 HRC é provável que tenham ocorrido trincas que são consequência da grande variação de temperatura sofrida por este material. Estas trincas são descontinuidades que afetam diretamente o desempenho estrutural do aço, e como este é muito aplicado a finalidades que envolvem diretamente a segurança de pessoas como nas indústrias automotivas e aeronáutica, este fator torna-se bastante preocupante. Porém, pode-se perceber comparando-se os valores obtidos nas outras duas condições, que os processos de pré e pós-aquecimento influenciam diretamente nesta propriedade minimizando os efeitos da temperatura.

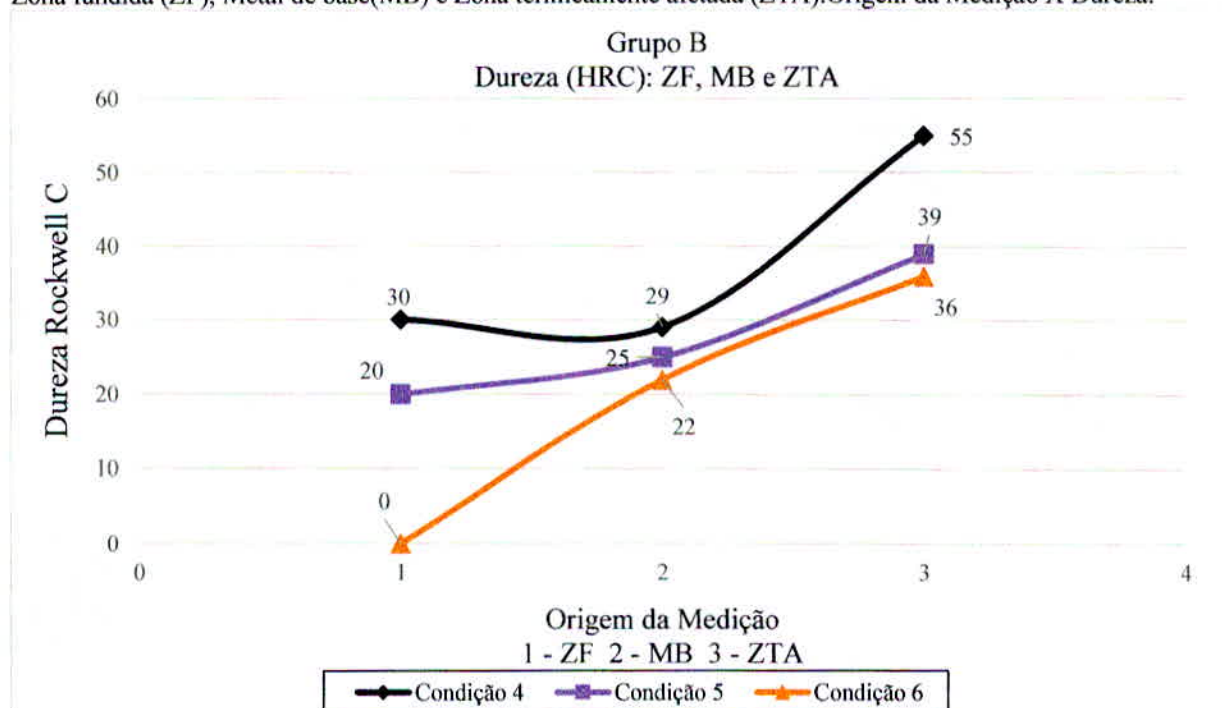
Outro fator a ser avaliado é a dureza relativamente baixa na zona fundida, o que leva a ser questionada a efetividade do consumível utilizado para a soldagem deste aço, pois, em todas as três condições avaliadas este apresentou dureza abaixo da encontrada no metal de base. Este fator pode ser um grave problema em aplicações onde for exigida do material, resistência superficial ao contato, fazendo que a região soldada seja um ponto crítico neste quesito também.

### 6.1.2 Avaliação dos resultados Grupo B

Os resultados obtidos para as peças do Grupo B, podem ser vistos na figura 24.



Figura 25: Gráfico comparativo entre as durezas encontradas para corpos de prova do Grupo respectivamente: Zona fundida (ZF), Metal de base (MB) e Zona termicamente afetada (ZTA). Origem da Medição X Dureza.



Devido a utilização de corrente mais alta para a soldagem, por volta de 280 houve algumas variações bastante particulares neste grupo de peças.

A primeira situação a se avaliar é na condição 4, onde a zona fundida apresentou um valor de dureza maior que o valor encontrado no metal de base, sendo que este ficou a ordem de 1 HRC acima. Pode-se afirmar que esta atingiu um valor que seria aceitável caso o material fosse solicitado por esforços provenientes de atrito, mas no entanto a ZTA atingiu 55 HRC, onde provavelmente sofreu mudança microestruturais ficando susceptível ao aparecimento de trincas e imperfeições causadas pelo acúmulo de tensões térmicas, o que pode comprometer a atuação deste quando submetido a esforços dinâmicos.

As amostras 5 e 6 apresentaram propriedades parecidas no metal de base e ZTA, porém apresentaram uma grande diferença quando comparadas as zonas fundidas, sendo que a peça 5 ficou na média atingindo 20 HRC, porém, a peça 6 apresentou dureza que não pode ser medida na escala C. Levando em consideração estes fatores fica visível a necessidade de se aplicar outros testes com o objetivo de realizar medições mais precisas.

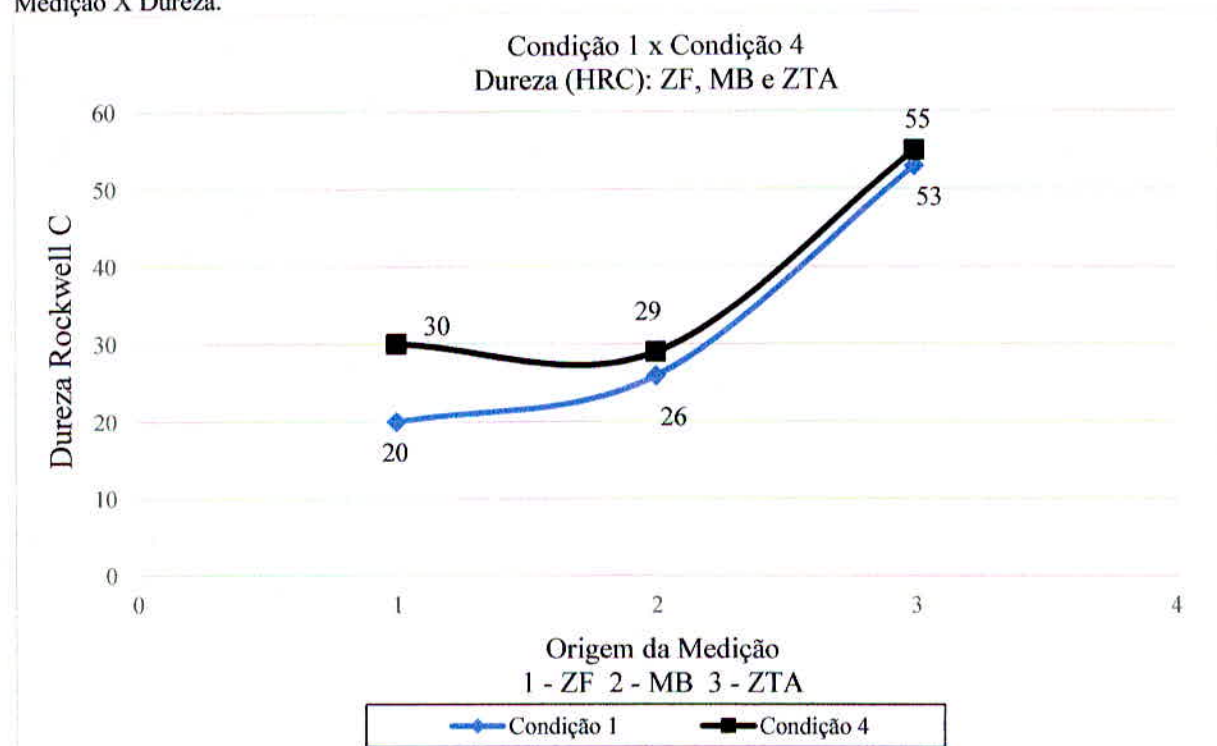
### 6.1.3 Resultados Grupo A x Grupo B

Visando avaliar as implicações da corrente de soldagem nos resultados obtidos, será realizado um estudo comparativo entre as amostras soldadas com os mesmos processos de pré e pós-soldagem, porém em correntes diferentes.

#### 6.1.3.1 Condição de soldagem 1 x 4

A figura abaixo compara as condições dos corpos de prova soldados nas condições 1 e 4

Figura 26: Gráfico comparativo entre as durezas encontradas para corpos de prova soldados nas condições 1 e 4 respectivamente: Zona fundida (ZF), Metal de base (MB) e Zona termicamente afetada (ZTA). Origem da Medição X Dureza.



Fonte: Autor

As duas amostras em questão foram soldadas respectivamente com 260 A e 280 A, e não foram utilizadas técnicas de tratamento térmico para a contenção das tensões provenientes do processo de soldagem. Pode-se verificar que ambas as condições de soldagem apresentaram valores de dureza com uma diferença considerável quando comparadas as durezas da ZTA e os valores encontrados na zona fundida ficando em 25 HRC na condição 1 e 33 na condição 4, é um fator relevante que a peça soldada com corrente mais baixa apresentou uma maior diferença entre as regiões soldadas.

O consumível de soldagem se mostrou mais efetivo na condição 4, onde o valor da dureza na zona fundida e metal de base ficaram em condições próximas o que garante as

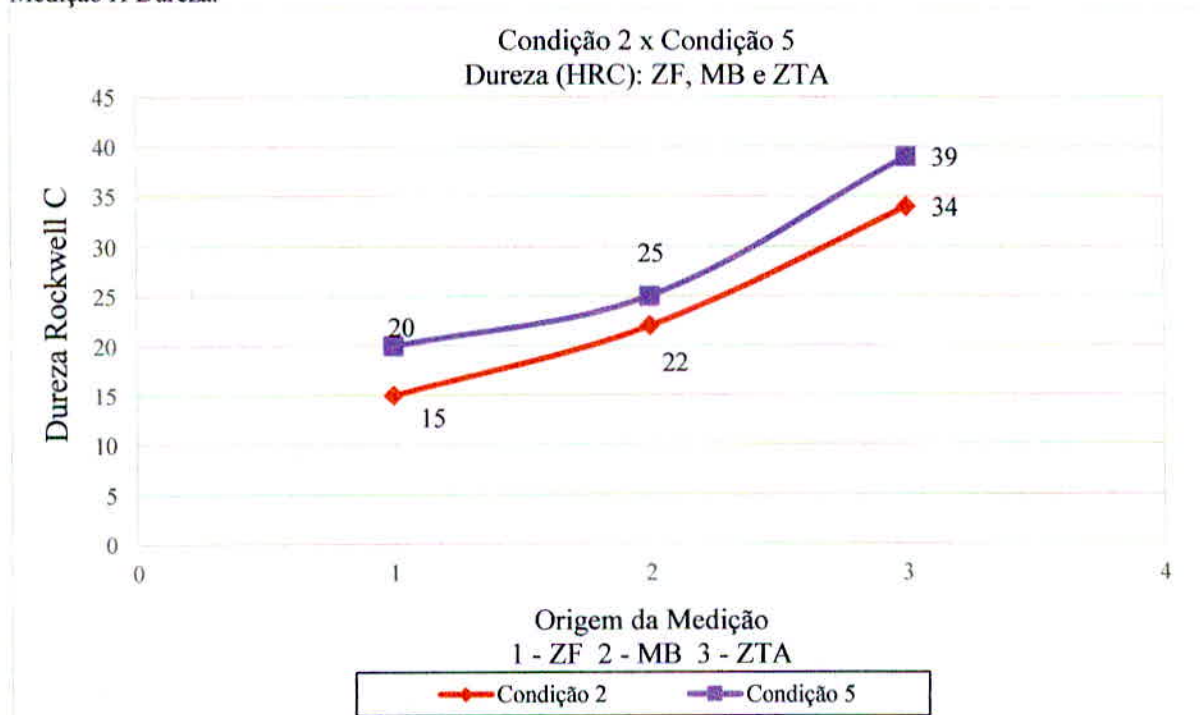
propriedades superficiais do material, porém a dureza encontrada na ZTA foi de 55 HRC, um valor preocupante devido ao acúmulo de tensões térmicas e também a formações de descontinuidades como trincas a quente no material.

A elevação da dureza se deve a provável formação de microestruturas como a martensita que tem a elevada dureza porém, se não for gerada por um processo controlado pode levar o material a fragilidade estrutural.

### 6.1.3.2 Condição de soldagem 2 x 5

Os resultados apresentados na figura abaixo demonstram os valores de dureza encontrados respectivamente nos corpos de prova 2 e 5.

Figura 27: Gráfico comparativo entre as durezas encontradas para corpos de prova soldados nas condições 2 e 5 respectivamente: Zona fundida (ZF), Metal de base (MB) e Zona termicamente afetada (ZTA). Origem da Medição X Dureza.



Nos corpos de prova em questão foi aplicado o procedimento de pré aquecimento a temperatura de 300 °C, e é perceptível que este foi benéfico para o processo, pois, a dureza na ZTA de ambas as peças diminuiu consideravelmente quando comparadas as situações 1 e 4 onde não foram aplicados processos de atenuação das tensões. Houve também uma diminuição entre as durezas da zona termicamente afetada e o metal de solda.

As durezas encontradas na zona termicamente afetada dos dois corpos de prova foram respectivamente 34 e 39 HRC, valores que são mais satisfatórios quanto a solicitações que exijam tenacidade. Em contrapartida o metal de base apresentou valores 22 e 25 HRC respectivamente, porém, o metal de solda ficou abaixo dos valores do metal de base ficando entre 15 e 20 HRC.

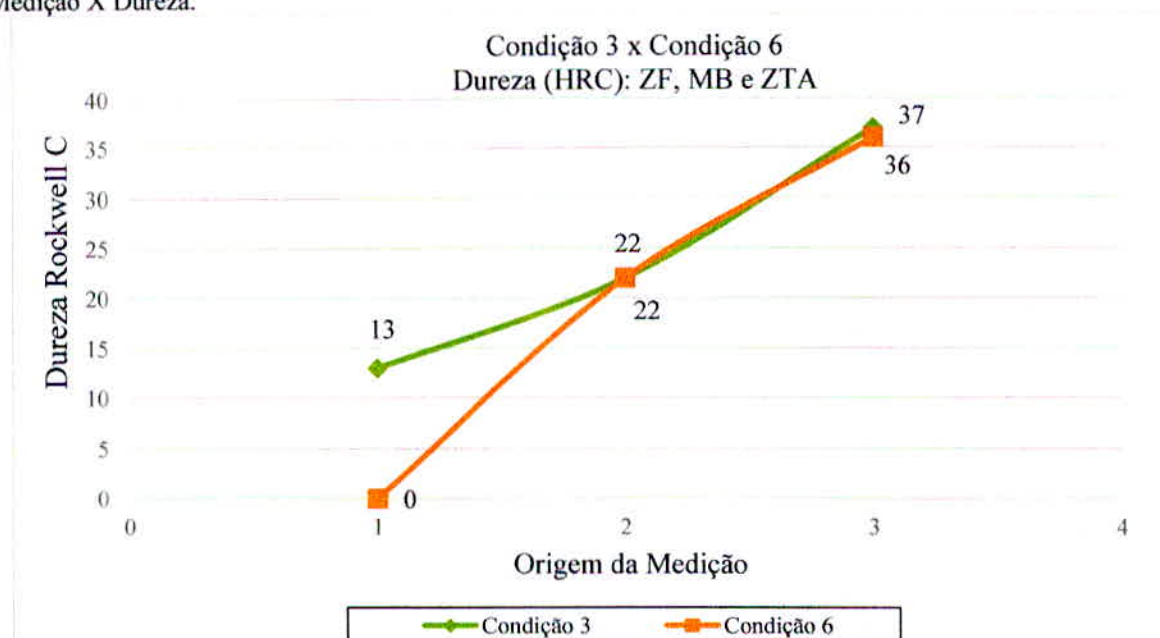
As menores durezas na ZTA se devem provavelmente a formação de martensita revenida, o que ocorreu devido ao processo de pré aquecimento que adicionou uma quantidade de calor uniforme ao longo da peça, fazendo que esta aumentasse seu tempo necessário para resfriamento, assim aliviando as tensões térmicas geradas no processo de soldagem.

Estes valores quando comparados demonstram que a diferença entre as correntes de soldagem não altera significativamente as propriedades do material, entretanto o corpo de prova soldado a 280 A apresentou valores maiores de dureza, porém a variação entre a maior e menor dureza medidas nestes apresentou variações iguais a 19 HRC.

### 6.1.3.3 Condição de soldagem 3 x 6

A figura abaixo demonstra os resultados das medições de dureza nos corpos de prova 3 e 6, estes que foram submetidos aos processos de pós e pré-aquecimento.

Figura 28: Gráfico comparativo entre as durezas encontradas para corpos de prova soldados nas condições 3 e 6 respectivamente: Zona fundida(ZF), Metal de base(MB) e Zona termicamente afetada(ZTA). Origem da Medição X Dureza.



Fonte: Autor

As curvas de dureza dos corpos de prova em questão demonstram características bastante semelhantes, principalmente nas regiões de metal de base e zona termicamente afetada.

No metal de base das duas amostras as durezas apresentaram o mesmo valor, que foi de 22 HRC, esta situação se manteve ainda na ZTA onde houve uma variação pouco significativa entre as duas condições avaliadas.

A zona fundida apresentou uma diferença significativa, pois, a amostra soldada na condição 3 demonstrou na medição de dureza um valor de 13 HRC, um valor baixo quando comparado ao valor do metal de base, já o corpo de prova soldado na condição 6 apresentou resultado que não pode ser medido na escala HRC.

A combinação dos processos de pré e pós-aquecimento não causa grandes variações no metal de base e na zona termicamente afetada, porém no metal de solda houve uma diminuição brusca na dureza o que pode causar sérias consequências quando a peça soldada for utilizada em engrenagens, polias ou outras aplicações cujo a resistência superficial é fator primordial.

## **6.2 Avaliação da relevância dos resultados**

Os resultados demonstrados no item 6.1, demonstram a grande instabilidade do aço AISI 4340 quando submetido a soldagem, isso se deve a seus elementos de liga que o tornam extremamente transformável, e também é visto que estas mudanças podem ser atenuadas utilizando os parâmetros e os tratamentos térmicos corretos. Outro fator relevante, é que a variação dos parâmetros de soldagem não ocasionou diferenças significativas nas propriedades do material, porém os tratamentos térmicos se mostraram bastante benéficos para o controle das mudanças de característica deste material.

Durante o processo de aquecimento e resfriamento causados pela soldagem, o material tende a sofrer mudanças de microestrutura e isso é um dos fatores predominantes para que haja a fragilização e geração de tensões térmicas, pois, estas variações bruscas de temperatura podem gerar microestruturas como a martensita, que tem a característica de elevar a dureza do material.

Quando são empregados procedimentos de pré e pós-soldagem, estes adicionam energia em forma de calor ao material, porém de maneira controlada o que causa o revenimento destas estruturas de elevada dureza controlando as tensões térmicas geradas no processo de soldagem.

Em contrapartida foi visto que em algumas amostras estes processos podem causar algumas implicações desagradáveis às propriedades do material que combinadas ao consumível utilizado, afetam diretamente o comportamento deste quando submetido a tensões solicitantes.

### **6.3 Efetividade do consumível**

O consumível TubRod 95 K2, mostrou-se bastante versátil quanto a procedimento de soldagem e parametrização dos equipamentos, porém foi visto em algumas situações que o metal de adição apresentou valores de dureza inferiores às do metal de base, e isto é um fator a ser avaliado com bastante cautela, devido a este material ser amplamente utilizado em peças que trabalham sob a solicitação de esforços dinâmicos e de contato como em engrenagem, bielas, virabrequins entre outras.

Outro fator bastante relevante é alta dureza da ZTA que é consequência do aquecimento brusco e também da difusão de átomos que são desprendidos graças a alta energia utilizada na soldagem por arame tubular.

É questionável a viabilidade de aplicação deste consumível para esta aplicação, porém, para resultados mais concretos deve ser realizado um estudo mais detalhado comparando este a outros consumíveis indicados para a soldagem deste aço.

### **6.4 Resistência mecânica**

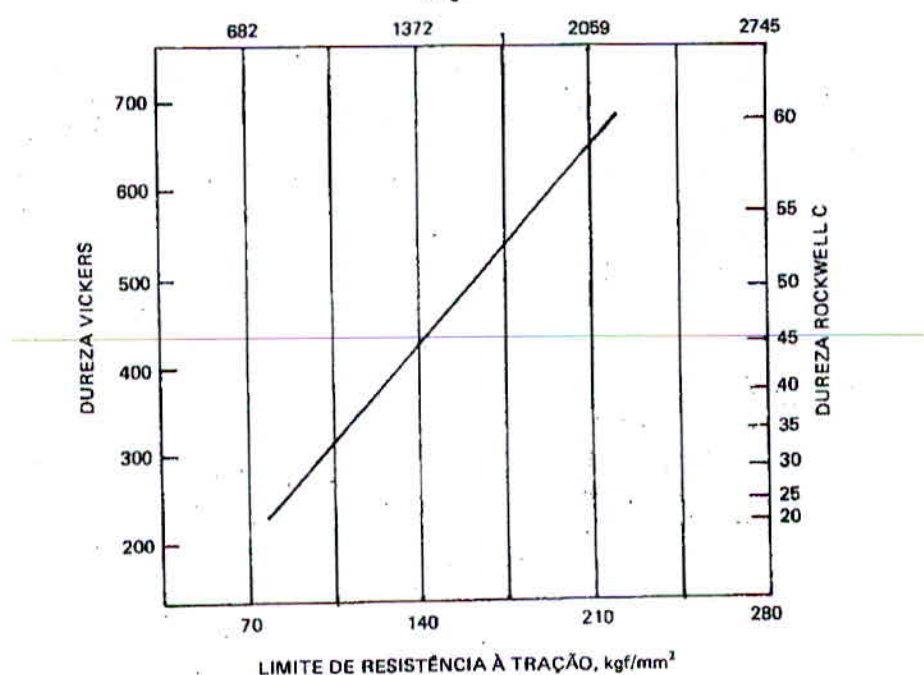
A dureza é uma grandeza que basicamente mede a resistência que o material oferece quando solicitado por um esforço superficial que tende riscar ou penetrar sua superfície, portanto como visto no capítulo 4, o ensaio de dureza nos metais consiste basicamente em solicitar um corpo de prova por um esforço de compressão aplicado através de um penetrador cujo à forma e a matéria prima dependem do tipo de material a ser ensaiado. Então o valor da dureza se refere às dimensões impressas pelo penetrador, este fator traz uma relação direta entre esta propriedade e a resistência à tração apresentada por este.

Existem alguns gráficos e tabelas que correlacionam à resistência a tração do material e sua dureza, estes valores são estimativas feitas através de vários estudos do comportamento dos materiais, porém, os números apresentados nestas servem como base para ter-se uma ideia de como estes reagem quando submetidos a esforços de tração.

É bom salientar que a resistência à tração não é o único fator a ser levado em consideração no que se diz projeto de engenharia, pois, mesmo um material com dureza próxima de 60 HRC não necessariamente apresenta uma elevada resistência mecânica, porque este pode apresentar grande fragilidade quando solicitado por cargas cíclicas, cisalhamento e também esforços dinâmicos.

A figura 29 demonstra a relação entre as durezas nas escalas VICKERS e ROCKWELL C em aços e sua resistência a esforços de tração.

Figura 29: Gráfico resistência a tração x dureza  
-MP<sub>a</sub>



Fonte: (CHIAVERINI, 1986)

Analisando os dados da figura acima, nota-se que as amostras soldadas que apresentaram dureza na ZTA entre 55 3 60 estavam com valores de resistência à tração acima de 210kgf/mm<sup>2</sup>. Já às que ficaram entre 35 e 40 apresentaram valores por volta dos 105 kgf/mm<sup>2</sup> assim demonstrado que a dureza influencia diretamente nesta propriedade.

O metal de base em todas as amostras apresentou valores entre 20 e 30 HRC, ficando com valores resistência a tração entre os 70 kgf/mm<sup>2</sup> e 105 kgf/mm<sup>2</sup>.

A zona fundida foi a que apresentou os menores valores dureza, sendo que na maioria das amostras ficou abaixo dos 20 HRC, o que mostra resistência à tração abaixo dos 70 kgf/cm<sup>2</sup>, valor que é bastante baixo quando comparado ao das outras regiões da peça soldada.

Através desta comparação prévia tem-se uma ideia de como o material se comportaria, sendo que este provavelmente sofreria deformações não uniformes e teria como tendência a

ocorrência de uma fratura frágil próxima à zona de maior dureza. Entretanto não é possível conhecer com exatidão o comportamento deste sem, que seja realizado um ensaio de tração em máquina universal utilizando corpo de prova e parâmetros de trabalho padronizados.

Outro fator relevante é avaliar o quanto está mudança nas propriedades mecânicas afeta em suas propriedades quando este é submetido a esforços dinâmicos, para isso é necessário também que o material seja submetido a ensaio de impacto Charpy, fazendo-se uso de corpo de prova e bancada de testes padronizados e calibrados.

O conhecimento da resistência deste material quanto ao impacto também é e suma importância, pois, como já dito anteriormente o aço AISI 4340 é amplamente aplicado a peças solicitadas por esforços dinâmicos combinados com grandes tensões, o que exige que este trabalhe em situações extremas mantendo a confiabilidade e segurança.

## **6.5 Implicações da corrente de soldagem**

Durante os testes ficou visível que a variação de 20 A utilizada durante os ensaios não afeta diretamente nas propriedades do material, porém, é viável a realização de um estudo minucioso referente a “degraus” maiores entre as correntes para que seja avaliada sua influência real no processo de soldagem.

No entanto o que pode ser visto é que os processos de pós e pré-aquecimento se mostraram mais efetivos, causando mudanças mais significativas nas propriedades do material. Esta situação fica visível quando comparados os resultados das amostras 1 e 4 que foram submetidas a condição de soldagem utilizando-se apenas correntes diferentes, pode-se ver que estas comportaram-se de maneira bastante semelhante.

Para uma melhor avaliação das implicações da corrente devem ser adotados outros métodos, como a macrografia, com o objetivo de avaliar a profundidade da penetração e as áreas de ZTA e ZF. Uma correlação entre dureza, profundidade de penetração, juntamente com o conhecimento das áreas citadas e a corrente de soldagem são parâmetros importantes na concepção e execução de procedimentos de soldagem de manutenção.



## 7 CONCLUSÃO

Durante a avaliação dos resultados foi possível observar que houve grandes variações nos valores de dureza para as peças soldadas sem a aplicação de tratamentos térmicos e também que o consumível de soldagem não demonstrou resultados satisfatórios quanto à dureza superficial do cordão.

Outro fator relevante é que a corrente de soldagem não teve influência direta nos resultados, fazendo que os tratamentos térmicos de pré e pós-aquecimento fossem os fatores determinantes no controle das propriedades do material.

A efetividade consumível foi um dos fatores mais questionáveis, no que tange a resistência superficial, porém, quando avaliados outros fatores como penetração, estabilidade na operação e ductilidade, este se mostrou satisfatório.

O aço AISI 4340, apresenta vários desafios quanto a soldagem por métodos convencionais, mas é de suma importância que novos estudos continuem a ser realizados nesse sentido. Por este ser um material de alto desempenho aplicado a componentes vitais dos mais diversos tipos de máquinas, adaptá-lo a processos de soldagem versáteis como o FCAW, torna-se imprescindível para garantir a competitividade e manutenibilidade dos equipamentos nos quais este é aplicado. Pois, a soldagem na maioria das vezes é o processo de fabricação que possibilita a maior versatilidade no desenvolvimento de fabricação e manutenção de componentes em local de uso.

Portanto, o estudo desenvolvido neste trabalho demonstra que é possível soldar o aço transformável AISI 4340 utilizando o processo arame tubular (FCAW) utilizando o consumível TubRod 95k2, desde que este seja submetido a tratamentos térmicos e que os parâmetros de processo sejam conhecidos e controlados durante todo o procedimento de soldagem.

As observações e conclusões realizadas no presente estudo deixam algumas oportunidades de melhoria e estudos futuros.

Desta forma seguem abaixo algumas sugestões de trabalhos a serem realizados futuramente que podem ser utilizadas como complemento e até mesmo continuação do presente estudo.

- a) Realizar uma avaliação micrográfica da região soldada, com objetivo de conhecer as microestruturas e os diferentes tipos destas para cada condição;
- b) Utilizar ensaio de microdureza, visando aumentar a precisão das medições;

- c) Realizar ensaios de tração em corpos de prova padronizados, avaliando a resistência mecânica destes;
- d) Verificar se existem mudanças nas propriedades que comprometem a capacidade do material de absorver energia;
- e) Avaliar o comportamento de juntas soldadas neste material, quando submetidas a carregamentos cíclicos.

## REFERÊNCIAS

- ASTM. **Metals Test Methods and Analytical Procedures**. Philadelphia: Staff, 1983.
- BARBEDO, Nancy Del Duca. **Avaliação comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW utilizando aço ASTM A-36 para verificar a soldabilidade, propriedades metalúrgicas e geométricas, e resistência mecânica**. Itajubá: Unifei, 2011.
- Brasil NBR 7239: **Chanfro de Solda Manual para a construção naval**. Rio de Janeiro: ABNT. 1982. mar.
- BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Processo de Soldagem GMAW Pulsado**. Belo Horizonte: UFMG, 2000?
- CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução**. 5ed. LTC, São Paulo, 2002.
- CAMPOS, P. T. **Caracterização mecânica e microestrutural de juntas soldadas pelos processos MIG/MAG (GMAW) e arame tubular (FCAW)**. 2005. 75 p. **Dissertação (Mestrado 59 em Engenharia Mecânica)** – Departamento de Ciências Exatas e de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba.
- CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 1986.
- ESAB. **Eletrodos Inoxidáveis**. ESAB BR, 2000?
- FBTS, Fundação Brasileira de Tecnologia de Soldagem. **Curso de Inspetor de Soldagem**. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: FBTS, 2000?.
- FILHO, Júlio de Mesquita. **Influência da atmosfera protetora no cordão de solda obitado através dos processos FCAW e GMAW**. Ilha Solteira: UNESP, 2008.
- FORTES, Cleber. **Apostila Arames Tubulares**. ESAB BR, 2004.
- FORTES, Cleber. **Metalurgia da Soldagem**. ESAB BR, 2004.
- FORTES, Cleber, e Welerson ARAUJO. **Arames Tubulares OK**. ESAB BR, 2004.
- MARQUES, Paulo Vilani, Paulo José MODENESI, e Alexandre Queiroz BACARENSE. **Soldagem. Fundamentos e Tecnologia**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.
- MODENESI, Paulo J., Paulo V. MARQUES, e Dagoberto B SANTOS. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, 2011.
- MODENESI, Paulo José. **Terminologia usual em soldagem e símbolos**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2008.

OLIVEIRA, Adir Rodrigues, ARAÚJO, Ismael Caetano Júnior, SILVA, Gilberto. **Influência da temperatura no revenimento do aço SAE 4340**. São José dos Campos: UNIVAP, 2000?

QUITES, Almir Monteiro. **Introdução à soldagem a arco voltaico**. Florianópolis: Soldasoft, 2002.

QUITES, Almir Monteiro, e Jair Carlos DUTRA. **Tecnologia da soldagem a arco voltaico**. Florianópolis: EDEME, 1979.

RODRIGUES, Lucilene de Oliveira. **Análise e otimização de parâmetros na soldagem com arame tubular**. Itajubá: UNIFEI, 2005.

SCHEID, Adriano. *Curso Básico de Aços*. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2010.

SCHMOLZ, Bickenbach. “Aço ABNT/AISI 4340.” SCHMOLZ + BICKENBACH. Disponível em: [http://www.schmolzbickenbach.com.br/fileadmin/user\\_upload/\\_SCHULUNG\\_/Brasilien/FIC\\_HAS\\_TECNICAS/4340.pdf](http://www.schmolzbickenbach.com.br/fileadmin/user_upload/_SCHULUNG_/Brasilien/FIC_HAS_TECNICAS/4340.pdf). Acesso em: 2014 de abril de 2014.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos. Fundamentos Teóricos e práticos**. São Paulo: Edgar Blucher, 1982.

STARLING, Cícero M. D., Paulo J. MODENESI, e Tadeu M. D. BORBA. “Caracterização do Cordão na Soldagem FCAW como um Arame Tubular "Metal Cored"” *Soldage. Insp.*, Belo Horizonte, 2011: 285 - 300.

SUBRAMANIAM, S. et al. *Droplet transfer in pulsed gas metal arc welding of aluminum*. *Welding Journal*, v. 77, n. 7, p. 458-464, 1998.

UFJF. **Portal Universidade Federal de Juiz de Fora**. Juiz de Fora, MG Disponível em: [www.ufjf.gov.br](http://www.ufjf.gov.br) Acesso em: 30 de 05 de 2014.

Vieira, Luiz Fábio dos Santos, **Comportamento mecânico do aço AISI 4340 revestido com WC-CrCNI; WC-10Ni; Ni-20Cr; Ni-Cr-B-Si-Fe; Cr3C2-NiCr pelo processo HVOF**. Tese (doutorado) Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá – SP, 2012. 164 f.

VENTRELLA, V. A.; GALLEGOS, J.; MOREIRA, A. F. *The Effect of CO2 addition on the weld Metal for flux Cored arc welding with AWS E309LT-1*. 2006.

VILARES, Metals. **Aços Especiais para aplicações mecânicas V4340T**. Agosto de 2008. Disponível em: [http://www.villaresmetals.com.br/portuguese/files/FT\\_15\\_V4340T.pdf](http://www.villaresmetals.com.br/portuguese/files/FT_15_V4340T.pdf) Acesso em: 30 de 05 de 2014.

VOGAS, Paulo vinício Brown Duarte. **Efeito do preaquecimento e tratamento térmico pós-soldagem nas propriedades mecânicas e microestruturais de metal de solda de aço de alta resistência obtidos por processo arame tubular tipo flux cored**. Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro: Cefet-RJ, 2012.

WELDING, BÖHLER. **Arames Tubulares para Aços Inoxidáveis**. Kapfenberg: Böhler-Welding-St. 1, 2006.