

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL  
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIA**

**MOISÉS SANTOS MACEDO**

**ANÁLISE COMPARATIVA DA JUNTA SOLDADA DO AÇO SAE 4130 PELOS  
PROCESSOS GMAW E GTAW APLICADOS À FABRICAÇÃO DO CHASSI DE  
VEÍCULO OFF-ROAD BAJA SAE**

**BENTO GONÇALVES**

**2019**

**MOISÉS SANTOS MACEDO**

**ANÁLISE COMPARATIVA DA JUNTA SOLDADA DO AÇO SAE 4130 PELOS  
PROCESSOS GMAW E GTAW APLICADOS À FABRICAÇÃO DO CHASSI DE  
VEÍCULO OFF-ROAD BAJA SAE**

Trabalho de conclusão do curso, apresentado no Centro de Ciências Exatas da Natureza e de Tecnologia do Campus Universitário da Região dos Vinhedos, na Universidade de Caxias do Sul, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. Victor Hugo Velazquez Acosta

**BENTO GONÇALVES**

**2019**

**MOISÉS SANTOS MACEDO**

**ANÁLISE COMPARATIVA DA JUNTA SOLDADA DO AÇO SAE 4130 PELOS  
PROCESSOS GMAW E GTAW APLICADOS A FABRICAÇÃO DO CHASSI DE  
VEICULO OFF-ROAD BAJA SAE**

Trabalho de conclusão do curso, apresentado no Centro de Ciências Exatas da Natureza e de Tecnologia do Campus Universitário da Região dos Vinhedos, na Universidade de Caxias do Sul, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

**Aprovado (a) em: 13/12/2019**

**Banca Examinadora**

Prof. Me. Eng. Victor Hugo Velazquez Acosta  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Eng. Vagner Grison  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Eng. Carlos Roberto Altafini  
Universidade de Caxias do Sul - UCS

## RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo analisar as características mecânicas e metalúrgicas da junta soldada, utilizada na união de tubos com espessura fina do aço de ultra-alta resistência SAE 4130 pelos processos de soldagem GMAW e GTAW. O estudo comparou qual dos dois processos tem as características e propriedades metalúrgicas mais apropriadas para o projeto BAJA SAE. Nesse trabalho os tubos do aço SAE 4130, tem diâmetro externo de 31,75 mm e 28,55 mm de diâmetro interno, com uma parede de 1,60 mm. Os tubos foram soldados aos pares resultando em uma junta soldada a 90 graus, onde no processo GMAW a solda foi feita com arame eletrodo, já no processo GTAW com material de adição. As juntas soldadas foram submetidas a ensaios de tração, fadiga, metalografia e microdureza. Como resultado, ensaios realizados mostraram que a soldagem GMAW foi melhor em comparação com soldagem GTAW. O que se pode constatar, é que em todas as juntas soldadas pelo processo GMAW, a solda rompeu no metal base, já no processo GTAW, romperam na região soldada.

**Palavras-chave:** SAE 4130, soldagem, processo GMAW, processo GTAW.

## ABSTRACT

The present job aimed the analysis of mechanical and metallurgical characteristics from welded joints, used to splice SAE 4130 ultra-high strength low thickness steel tubes by GMAW and GTAW welding processes. This review compared which of the two processes has the most appropriate metallurgical characteristics and properties for the BAJA SAE project. In this job, SAE 4130 steel pipes have a 31,75mm external diameter and a 28,55mm internal diameter, with a 1.60mm wall. The tubes were welded in pairs, resulting in a 90 degree welded joint, such that on GMAW process the welding was done using wired electrodes, while on GTAW process with addition material electrodes. The welded joints were submitted to tensile, fatigue, metallography and microhardness tests. The outcoming performed tests showed that, in this case, the GMAW welding process was better than the GTAW process. The conclusion is that, in all GMAW process welded joints, the broke up zone was in the basis metal, while on GTAW process, the breaking occurred exactly at the weld bead.

**Key-words:** 4130 SAE steel, welding, GMAW welding process, GTAW welding process.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Chassi Programa Baja SAE .....	14
Figura 2 - Diagrama de equilíbrio Fe-C .....	17
Figura 3 – Conceito de energia de soldagem.....	21
Figura 4 - Ciclo térmico de soldagem.....	21
Figura 5 - Curvas de repartição térmica em diferentes níveis de energia .....	23
Figura 6 - Regiões de solda e suas temperaturas.....	24
Figura 7 - Estrutura esquemática ZTA .....	26
Figura 8 - Processo de soldagem.....	28
Figura 9 - Arco elétrico de soldagem.....	28
Figura 10 - Soldagem GMAW .....	29
Figura 11 – Soldagem GTAW .....	30
Figura 12 – Fluxograma de atividades .....	33
Figura 13 - Usinagem na extremidade do tubo .....	35
Figura 14 - Máquina utilizada para solda .....	36
Figura 15 – CP GMAW.....	37
Figura 16 – CP GTAW .....	38
Figura 17 – Dispositivo e fixação dos CP .....	39
Figura 18 – Ensaio de fadiga – junta soldada GTAW.....	40
Figura 19 – Preparação das amostras para ensaio metalográfico .....	41
Figura 20 – Regiões de análise micrográfica .....	42
Figura 21 – Tensão de escoamento ensaio de tração MB x certificado .....	44
Figura 22 - Tensão de ruptura ensaio de tração MB x certificado .....	44
Figura 23 – Desvio padrão tensão de escoamento x tensão de ruptura .....	45
Figura 24 – Tensão de escoamento juntas soldadas .....	46
Figura 25 – Tensão de ruptura juntas soldadas .....	46
Figura 26 – Regiões de rompimento GMAW e GTAW .....	47
Figura 27 – Tensão de escoamento com desvio padrão.....	47
Figura 28 – Tensão de ruptura com desvio padrão.....	47
Figura 29 - Fadiga de juntas soldadas .....	48
Figura 30 - Distribuição normal “Teste T” - Fadiga.....	49
Figura 31 – Regiões fraturadas GMAW e GTAW .....	50
Figura 32 – Macrografia das juntas soldadas.....	51

Figura 33 – Região A: metal base .....	51
Figura 34 – Região B: zona de transição entre MB e ZTA (GMAW) .....	52
Figura 35 - Região B: zona de transição entre MB e ZTA (GTAW).....	52
Figura 36 - Região C, D e E: ZTA e transição ZF (GMAW).....	53
Figura 37 - Região C, D e E: ZTA e transição ZF (GTAW) .....	53
Figura 38 - Região E: ZF (GMAW) .....	54
Figura 39 - Região E: ZF (GTAW).....	54
Figura 40 – Perfil de microdureza das amostras GMAW e GTAW.....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química limites mínimos e máximos do aço SAE 4130 .....	19
Tabela 2 – Propriedades mecânicas aço SAE 4130 – temperado e revenido em água .....	19
Tabela 3 - Rendimento térmico médio .....	19
Tabela 4 – Composição química do aço SAE 4130 .....	34
Tabela 5 - Propriedades mecânicas do aço SAE 4130 - normalizado .....	34
Tabela 6 – Parâmetros soldagem GMAW .....	37
Tabela 7 – Parâmetros soldagem GTAW .....	38
Tabela 8 – Resultados das tensões do ensaio de tração MB .....	43
Tabela 9 - Resultado ensaio de tração juntas soldadas .....	46
Tabela 10 - Resultado ensaio de fadiga juntas soldadas .....	48

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação (1) – Energia de Soldagem.....	20
Equação (2) – Velocidade de Soldagem.....	21
Equação (3) – Temperatura de Pico.....	22
Equação (4) – Carbono Equivalente.....	27

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MB	Metal Base
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
RATBSB	Regulamento Administrativo e Técnico Baja SAE Brasil
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
UHSS	<i>Ultra High Strength Steels</i>
ULSAB	<i>Ultralight Steel Auto Body</i>
ZF	Zona Fundida
ZTA	Zona Térmica Afetada

## LISTA DE SÍMBOLOS

$C_{eq}$	Carbono Equivalente
Fe-C	Ferro e Carbono
CP	Corpo de Prova
ST	Segmento tubular
$T_C$	Temperatura Crítica
$T_f$	Temperatura de Fusão
$T_p$	Temperatura de Pico

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA .....	14
1.2	OBJETIVO GERAL.....	15
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>16</b>
2.1	AÇOS-CARBONO E AÇOS-LIGAS.....	16
<b>2.1.1</b>	<b>Microestrutura dos Aços</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Aço de Ultra-Alta Resistência (UHSS)</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Aço SAE 4130</b> .....	<b>18</b>
2.2	METALURGIA DA SOLDAGEM.....	19
<b>2.2.1</b>	<b>Fluxo de Calor</b> .....	<b>20</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Macroestruturas de Soldas por Fusão</b> .....	<b>23</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Características da Zona Fundida (ZF)</b> .....	<b>24</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Características da Zona Termicamente Afetada (ZTA)</b> .....	<b>25</b>
<b>2.2.5</b>	<b>Trincas</b> .....	<b>26</b>
<b>2.2.6</b>	<b>Processo de Soldagem</b> .....	<b>27</b>
<b>2.2.7</b>	<b>Arco Elétrico de Soldagem</b> .....	<b>28</b>
<b>2.2.8</b>	<b>Soldagem GMAW</b> .....	<b>29</b>
<b>2.2.9</b>	<b>Soldagem GTAW</b> .....	<b>30</b>
2.3	ARTIGOS RELACIONADOS AO TEMA.....	31
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>33</b>
3.1	MATERIAL ANALISADO .....	34
3.2	PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	35
<b>3.2.1</b>	<b>Usinagem</b> .....	<b>35</b>
3.3	SOLDAGEM .....	35
<b>3.3.1</b>	<b>Métodos e Parâmetros GMAW</b> .....	<b>36</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Métodos e Parâmetros GTAW</b> .....	<b>37</b>
3.4	ENSAIO DE TRAÇÃO .....	38
3.5	ENSAIO DE FADIGA.....	40
3.6	ENSAIO METALOGRÁFICO.....	41
3.7	ENSAIO MICRODUREZA VICKERS.....	42
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>43</b>
4.1	ENSAIO DE TRAÇÃO .....	43
<b>4.1.1</b>	<b>Ensaio de tração no metal base (MB)</b> .....	<b>43</b>

<b>4.1.2</b>	<b>Ensaio de tração Junta soldada.....</b>	<b>45</b>
4.2	ENSAIO DE FADIGA.....	48
4.3	ENSAIO METALOGRÁFICO.....	50
<b>4.3.1</b>	<b>Macrografia .....</b>	<b>50</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Micrografia .....</b>	<b>51</b>
4.3.2.1	Região A: Metal Base.....	51
4.3.2.2	Região B: zona de transição entre MB e ZTA .....	52
4.3.2.3	Região C, D e E: ZTA e transição ZF.....	52
4.3.2.4	Região E: ZF .....	53
4.4	MICRODUREZA VICKERS .....	54
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>56</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>58</b>

## 1 INTRODUÇÃO

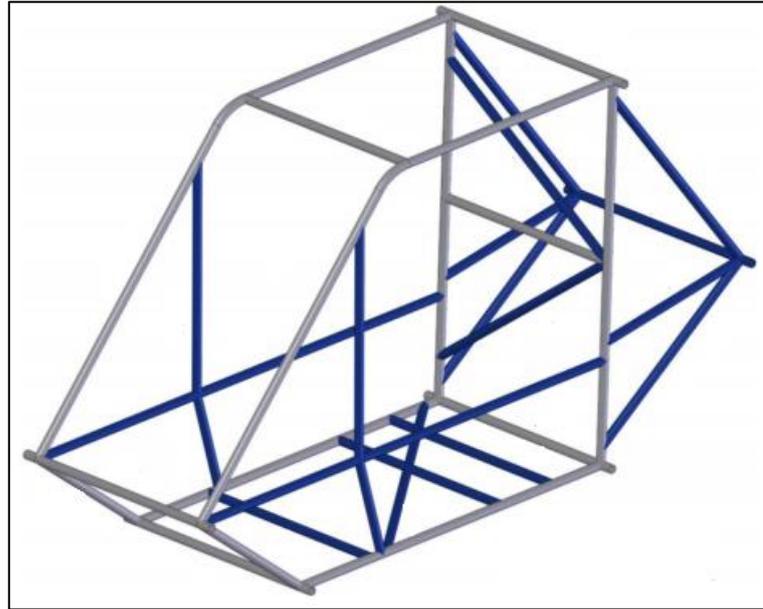
A concorrência entre montadoras de automóveis está presente nos dias atuais. As empresas do setor automobilístico sabem que para conquistar o cliente, precisam garantir em seus projetos fatores como: segurança, conforto e custo. Para conseguir sucesso nesses itens, as engenharias dessas empresas estão cada vez mais, desenvolvendo e pesquisando informações para projetar estruturas mais leves nos chassis de seus automóveis.

Um exemplo disso é programa *Ultralight Steel Auto Body* (ULSAB), que faz estudos para demonstrar como o aço pode reduzir o peso de um chassi e conseqüentemente garantir segurança e conforto por um custo menor. Os resultados desse programa são impressionantes. Houve uma redução de peso de 25%, sem penalidade no custo, melhoria de 80% na rigidez torcional e 52% na rigidez de flexão e, além disso, atende todos os requisitos de falha (ULSAB, 2019).

O projeto Baja SAE iniciou suas atividades em 1976 na Universidade da Carolina do Sul, Estados Unidos sob a direção do Dr. John F. Stevens. No Brasil, as atividades começaram a partir de 1991. Nesse projeto, alunos de engenharia, através dos conhecimentos obtidos em sala de aula têm o desafio de projetar, fabricar e testar um veículo *off-road*, em uma competição entre universidades (PORTAL, 2019). Com equipes constituídas por alunos de engenharia, a Universidade de Caxias do Sul, ingressou na competição em 1997.

Segundo o regulamento da competição, o chassi deve ser de tubos de aço cilíndrico, com a quantidade mínima de carbono de 0,18%, dobrados e ligados por meio de juntas soldadas. A Figura 1 ilustra o chassi. Assim sendo, a análise da soldabilidade, resistência mecânica e durabilidade dessas juntas soldadas são importantes, pois nessa região há concentração de tensões e conseqüentemente início a falhas.

Figura 1 - Chassi Programa Baja SAE



Fonte: adaptado RATBSB (2019)

## 1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

O projeto Baja SAE é criterioso na verificação do processo de soldagem do chassi nas competições. Os cálculos de tensões, rigidez e resistência a flexão são exigidos, juntamente com amostras de ensaio destrutivo e inspeção destrutiva, tudo para se ter certeza que as juntas soldadas, não irão romper.

Conseqüentemente, o conhecimento detalhado das características do material após a sua soldagem é vital para evitar falhas e acidentes durante a competição.

Frente a essa situação, esse trabalho busca estudar a soldabilidade do aço SAE 4130, através de dois processos de soldagem, GMAW e GTAW, que já foram utilizados na construção do chassi, em competições anteriores, onde a aprovação das juntas soldadas é de suma importância.

Além disso, o processo de soldagem GTAW é mais caro, demorado, de difícil execução no chassi do projeto Baja SAE. Logo, somente uma vantagem técnica poderia justificar seu uso.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

Analisar as juntas soldadas utilizadas nas uniões dos tubos com espessura fina de aço SAE 4130 para construção do chassi de veículo *off-road* BAJA SAE, pelo processos de soldagem GMAW e GTAW, verificando qual deles tem as características e propriedades metalúrgicas mais apropriadas para o projeto.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atender o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são previstos:

- Analisar as características do material aço de ultra-alta resistência SAE 4130, com objetivo de entender suas propriedades mecânicas.
- Realizar ensaios cíclicos, com carregamento estático na região da junta soldada (fadiga).
- Analisar a microestrutura e macroestrutura da região soldada através de ensaio metalográfico.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 AÇOS-CARBONO E AÇOS-LIGAS

Denomina-se aço, a liga ferro-carbono que possui uma porcentagem de carbono aproximadamente entre 0,008% até 2,11%, essa liga, também é denominada aço-carbono. Quando a liga ferro-carbono, contém outros elementos de liga, além do carbono, é chamada de aço-liga (CHIAVERINI, 1996).

De acordo, com a quantidade de carbono, os aços-carbonos são divididos em aços de baixo, médio e alto teor de carbono. Os aços de baixo teor de carbono têm a quantidade de carbono inferior a 0,2%, os aços de médio teor têm entre 0,2 e 0,5% e os de alto teor, tem a quantidade acima de 0,5%.

Os aços-liga são divididos em aços de baixo e alto teor de ligas, isto é, os aços de baixo teor de ligas, possuem elementos de liga abaixo de 8%, já os aços de alto teor de ligas, possuem elementos de liga acima de 8% (CHIAVERINI, 1996).

#### 2.1.1 Microestrutura dos Aços

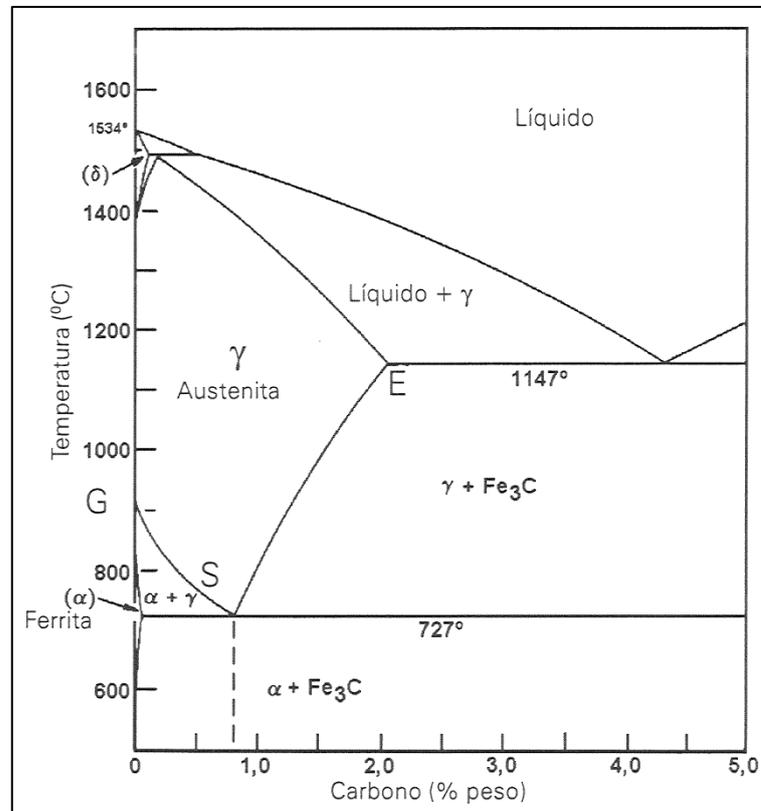
Para compreender melhor, a estrutura das ligas, o diagrama de equilíbrio Fe-C é importante. Esse diagrama mostra as fases e reações em função da quantidade de carbono e temperatura nas ligas de Fe-C. A Figura 2 ilustra o diagrama, onde as fases presentes são: líquido, austenita ( $\gamma$ ), ferrita ( $\alpha$  e  $\delta$ ) e cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ).

A ferrita ( $\alpha$ ) é uma solução sólida de carbono em ferro e possui uma estrutura cristalina de corpo centrado (CCC), ela existe até a temperatura de 912 °C. Porém a solubilidade do carbono é muito pequena nessa faixa de temperatura, podendo alcançar no máximo 0,020% a 727 °C. A ferrita ( $\delta$ ) tem a mesma estrutura cristalina (CCC), mas ela existe até atingir a temperatura de 1538 °C, quando o ferro funde. A solubilidade do carbono também é baixa, atingindo no máximo 0,09% a 1495 °C (SILVA; MEI, 2010).

A austenita ( $\gamma$ ) tem uma estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC) e existe entre as temperaturas de 727 e 1495 °C tem a capacidade de dissolver maiores quantidades de carbono, tem solubilidade máxima de 2,11% a 1148 °C. Já a cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) possui uma estrutura ortorrômbica de alta dureza (SILVA; MEI,

2010).

Figura 2 - Diagrama de equilíbrio Fe-C



Fonte: Marques; Modenesi; Bracarense, (2005)

Durante o processo de resfriamento, a austenita se transforma em ferrita (aços com porcentagem de carbono inferior de 0,8%) ou cementita (aços com porcentagem de carbono superior a 0,8%), isso porque a austenita tem pouca estabilidade abaixo da linha GSE, conforme Figura 2. Assim, abaixo da temperatura de 727 °C a austenita gerada produz uma reação eutetóide, que é a mistura de ferrita e cementita. Essa mistura, com velocidade de resfriamento baixa, possui um formato de camadas ou lamelas que é chamado de perlita (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

Então, para aços com porcentagem de carbono inferior a 0,8%, possuem uma microestrutura de ferrita e perlita, já para os aços com uma porcentagem maior que 0,8%, ocorre uma microestrutura de cementita e perlita. Caso a porcentagem for exatamente 0,8% são para os aços que tem na sua microestrutura somente perlita (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

Geralmente, aços com quantidades maiores de carbono têm nas suas microestruturas perlita e cementita, isto é, maior dureza e resistência mecânica,

porém, menor ductilidade e tenacidade. Por outro lado, a ferrita é macia, dúctil e tenaz. A cementita é dura e frágil. E por fim, a perlita tem alta dureza e baixa tenacidade (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

### **2.1.2 Aço de Ultra-Alta Resistência (UHSS)**

Teoricamente a tensão máxima que o ferro pode sustentar sob tração, estimando as forças necessárias a ultrapassar as atrações interatômicas é da faixa de 17167 MPa. Em virtude disso, juntamente com a necessidade de obter ligas de ferro com resistência mecânica cada vez maior, levou ao desenvolvimento dos aços denominados de ultra-alta resistência (CHIAVERINI, 1996).

Com o desenvolvimento da indústria aeronáutica e aeroespacial, esses aços vêm sendo cada vez mais solicitados, pois possuem tensão de escoamento superior a 1400 MPa. Além disso, possui tenacidade, resistência à fadiga e soldabilidade aceitáveis (SILVA; MEI, 2010). Os aços de ultra-alta resistência são empregados onde a relação resistência/peso é importante para o projeto (SILVA; MEI, 2010).

Primitivamente, os UHSS eram destinados a componentes de modernos aviões, com resistência a tração na faixa de 2060 MPa e atualmente para componentes de naves espaciais, mísseis, foguetes, etc., onde a resistência a tração pode estar na faixa de 2940 MPa (CHIAVERINI, 1996).

### **2.1.3 Aço SAE 4130**

Aço que tem em sua composição 0,30% de carbono, sendo definido como um aço que tem médio teor de carbono e baixa liga. Segundo Callister (2012), os aços que têm essas características podem ser tratados termicamente por austenitização, têmpera e depois revenido para melhorar suas propriedades mecânicas.

Além disso, sua composição química possui dois elementos de liga: o cromo e o molibdênio. O cromo aumenta a temperabilidade, tem boa soldabilidade e ductilidade. Já o molibdênio aumenta consideravelmente a temperatura de revenimento, ductilidade, temperabilidade. Também tem uma boa usinabilidade e elimina a fragilidade ao revenido (SOUZA, 1989).

A composição química do aço SAE 4130 é mostrada na Tabela 1. Já as suas

propriedades mecânicas, com o processo de têmpera e revenimento em água, são ilustradas na Tabela 2 (GALL; BOYER, 1985).

Tabela 1 – Composição química limites mínimos e máximos do aço SAE 4130

AISI-SAE	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo
4130	0,28-0,33	0,40-0,60	0-0,035	0-0,040	0,15-0,30	0,80-1,10	0-0,25	0,15-0,25

Fonte: adaptado de Gall; Boyer, (1985)

Tabela 2 – Propriedades mecânicas aço SAE 4130 – temperado e revenido em água

Temperatura (°C)	Resistência a Tração (MPa)	Tensão de Escoamento (MPa)	Alongamento em 50mm (%)	Redução em área (%)	Dureza (HB)
205	1765	1520	10,0	33,0	475
260	1670	1430	11,5	37,0	455
315	1570	1340	13,0	41,0	425
370	1475	1250	15,0	45,0	400
425	1380	1170	16,5	49,0	375
540	1170	1000	20,0	56,0	325
650	965	830	22,0	63,0	270

Fonte: adaptado de Gall; Boyer, (1985)

Tabela 3 - Rendimento térmico médio

Processo	Rendimento Térmico ( $\eta$ )
Arco Submerso	0,90 $\pm$ 0,90
Eletrodo Revestido	0,75 $\pm$ 0,10
Eletroescória	0,68 $\pm$ 0,13
MIG/MAG	0,75 $\pm$ 0,1
Gás	0,52 $\pm$ 0,27
TIG	0,65 $\pm$ 0,15
Laser	0,005 à 0,70
Feixe de Elétrons	0,87 $\pm$ 0,08

Fonte: adaptado de MACHADO (1996)

## 2.2 METALURGIA DA SOLDAGEM

O processo de solda é executável, com aplicação de calor. Com isso, alterações das propriedades do material, podem ocorrer na região da junta, isto é, a região onde as peças serão unidas por soldagem. Essas alterações dependem das

reações ocorridas durante o processo de solidificação e resfriamento do cordão de solda e de sua microestrutura (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005). Portanto, o entendimento desses fenômenos é vital.

### 2.2.1 Fluxo de Calor

Nos processos de soldagem, a junta soldada precisa atingir uma temperatura adequada, para que ocorra a fusão. Na soldagem por fusão, aplicam-se fontes de calor que variam de 2.000 a 20.000 °C, como exemplo o arco elétrico, que atinge cerca de  $8 \times 10^8$  W/m<sup>2</sup>. Essa energia concentrada ao ser deslocada ao longo da junta resulta na soldagem por fusão e solidificação. Mais do que isso, essa concentração de energia, gera gradientes térmicos elevados na faixa de  $10^2$  a  $10^3$  °C/mm e variações de temperatura de  $10^3$  °C/s, alterando a microestrutura e propriedades num volume reduzido. Resumidamente, esse fluxo, pode ser analisado pelo fornecimento de calor à junta e dissipação do mesmo pela peça (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

O fornecimento de calor à junta é a energia de soldagem, também conhecida por aporte térmico, que é a quantidade de energia por unidade de comprimento. Essa energia pode ser definida pela Equação (1), enquanto a Figura 3, mostra o conceito da mesma.

$$H = \frac{\eta V I}{v} \quad (1)$$

Onde:

$H$  é a energia de soldagem [J/mm];

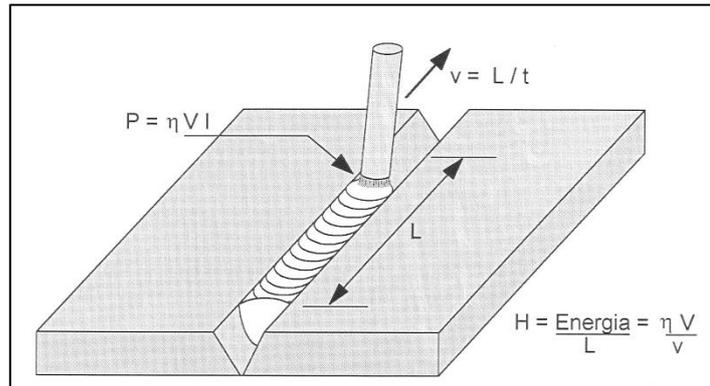
$\eta$  é o rendimento térmico [-];

$V$  é a tensão no arco elétrico [V];

$I$  é a corrente [A]; e

$v$  é a velocidade de soldagem [mm/s].

Figura 3 – Conceito de energia de soldagem



Fonte: Marques; Modenesi; Bracarense, (2005)

Como observado na Figura 3, a velocidade de soldagem ( $v$ ) pode ser calculada, através da Equação (2) e o valor do rendimento térmico médio, em função do processo de soldagem é obtido conforme Tabela 3.

$$v = \frac{L}{t} \quad (2)$$

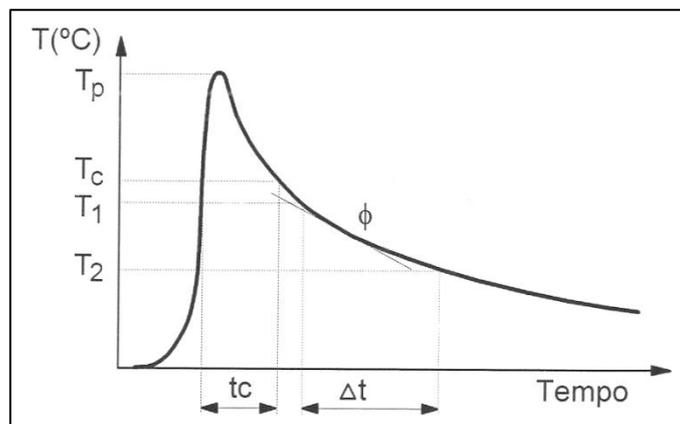
Onde:

$L$  é o comprimento da solda [mm];

$t$  é o tempo de soldagem [s].

A dissipação do calor na peça soldada ocorre por condução, dos locais que recebem o aquecimento para o restante. Esse aumento de temperatura pode ser estimado teoricamente ou experimentalmente (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

Figura 4 - Ciclo térmico de soldagem



Fonte: Marques; Modenesi; Bracarense, (2005)

Durante o fornecimento de calor no processo de soldagem, há uma diferença de passagem de calor, que afeta diretamente a peça em um determinado ponto, o qual é chamado de ciclo térmico. A Figura 4 ilustra esse ciclo térmico, com suas características.

Os parâmetros ilustrados no gráfico da Figura 4 são muito importantes no processo de soldagem, as quais são:

- Temperatura de pico ( $T_P$ ): é a máxima temperatura há que um ponto da peça pode chegar. Além disso, nessa temperatura é provável a ocorrência de transformações microestruturais. Para soldagens de um único passe com penetração total,  $T_P$  decresce em relação ao centro do cordão de solda e pode ser estimada pela Equação (3). A Figura 5 mostra a variação de  $T_P$  em relação ao cordão de solda, através de curvas, com dois níveis diferentes de energia ( $H_1$  e  $H_2$ ) (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

$$\frac{1}{T_P - T_0} = 4,133 \frac{\rho \cdot c \cdot h \cdot y}{H} + \frac{1}{T_f - T_0} \quad (3)$$

Onde:

$\rho$  é a massa específica do material ( $\text{kg}/\text{mm}^3$ );

$c$  é o calor específico ( $\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$ );

$y$  é a distância do ponto considerado à linha de fusão;

$h$  é a espessura da peça (mm);

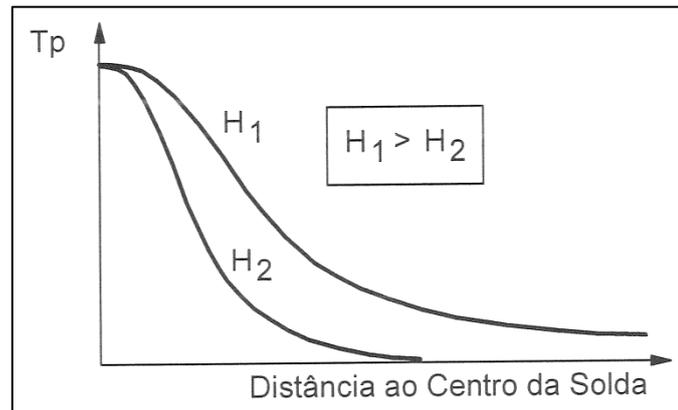
$T_f$  é a temperatura de fusão do material ( $^\circ\text{C}$ );

$T_0$  é a temperatura inicial ( $^\circ\text{C}$ );

$T_P$  é a temperatura de pico ( $^\circ\text{C}$ );

$H$  é a energia de soldagem ( $\text{J}/\text{mm}$ )

Figura 5 - Curvas de repartição térmica em diferentes níveis de energia



Fonte: Marques; Modenesi; Bracarense, (2005)

- Tempo de permanência ( $t_c$ ): é o tempo mínimo em que o ponto fica exposto à temperatura crítica ( $T_c$ ) para que haja alguma alteração microestrutural ou de propriedades (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).
- Velocidade de resfriamento ( $\phi$ ) – é a velocidade de resfriamento de uma solda, num determinado intervalo de tempo entre duas temperaturas ( $T_1$  à  $T_2$ ), conforme mostrado na Figura 4. A velocidade de resfriamento é muito importante na soldagem dos aços carbono, pois quando o metal é aquecido a altas temperaturas, são austenitizadas na região da solda e podem sofrer transformações no resfriamento (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

### 2.2.2 Macroestruturas de Soldas por Fusão

A curva de repartição térmica permite definir para um processo de solda por fusão, três regiões, as quais são:

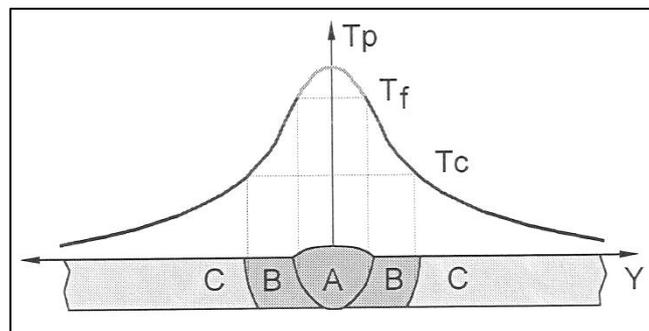
- Zona fundida (ZF): região em que as temperaturas de pico ( $T_p$ ) ultrapassam a temperatura de fusão ( $T_f$ ) do metal de base e onde ocorre a fusão e solidificação do material no processo de soldagem.
- Zona termicamente afetada (ZTA): região onde as temperaturas de pico ( $T_p$ ) ultrapassam a temperatura crítica ( $T_c$ ), mas é inferiores a temperatura de fusão ( $T_f$ ). Nessa região a microestrutura e propriedades foram alteradas pelo ciclo térmico, conseqüentemente, não há fusão do metal de

base.

- Metal de base (MB): região em que as temperaturas de pico ( $T_p$ ) são menores que a temperatura crítica ( $T_c$ ). Também é a parte mais distante do cordão de solda, onde o metal não foi alterado pelo processo de soldagem.

A Figura 6 contempla as regiões de solda e suas temperaturas, mostrando a seção de uma solda por fusão. A região *A* mostra a zona fundida (ZF), *B* zona termicamente afetada (ZTA), *C* o metal de base (MB), temperatura de pico ( $T_p$ ), temperatura de fusão ( $T_f$ ) e temperatura crítica ( $T_c$ ).

Figura 6 - Regiões de solda e suas temperaturas



Fonte: Marques; Modenesi; Bracarense, (2005)

### 2.2.3 Características da Zona Fundida (ZF)

A zona fundida pode ser formada por processos de soldagem por fusão, por exemplo, no processo GMAW, o metal de adição fundido é transferido para a poça de fusão em temperaturas muito altas. Abaixo do arco, se encontram as regiões com essas temperaturas, onde o metal de adição é misturado com o metal de base fundido, já na região posterior da poça de fusão a temperatura diminui e ocorre a solidificação, dando origem ao cordão de solda.

Durante o processo de solidificação, o cordão de solda tem seus grãos formados por colunas. Inicialmente, a solidificação da poça de fusão, ocorre pelo crescimento de grãos do metal de base que se encontram na fronteira entre a zona fundida e a zona termicamente afetada, garantido a continuidade metalúrgica nessa região (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

Após o processo de solidificação, a zona fundida, pode ter ainda modificações

nas suas propriedades. Como exemplo, nos aços carbono e aços de baixa liga, a poça de fusão se solidifica como ferrita delta, e posteriormente se transforma em austenita. A poça de fusão se transforma em uma mistura complexa de constituintes, com seu resfriamento, devido a vários fatores, como: tamanho de grão austenítico e quantidade de inclusões, composição química e velocidade de resfriamento (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

#### **2.2.4 Características da Zona Termicamente Afetada (ZTA)**

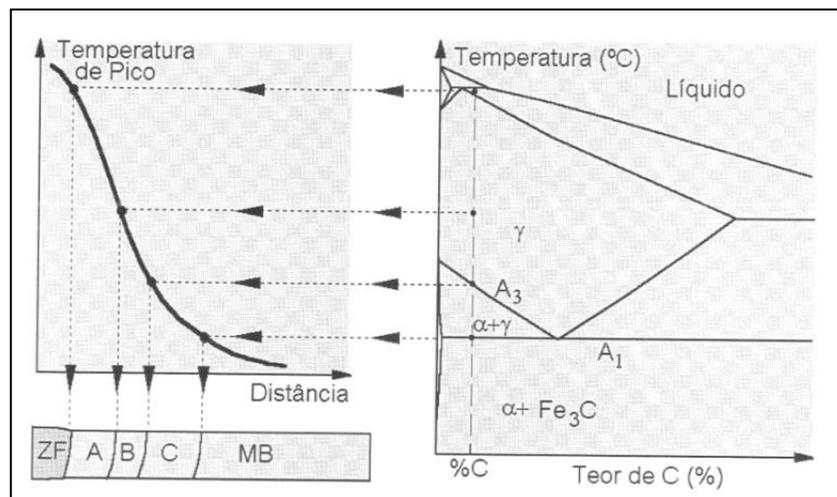
A zona termicamente afetada depende do tipo de metal de base, dos ciclos térmicos e repartição térmica. Possui três regiões, as quais são:

- Região de crescimento de grão: região do metal de base mais perto da solda e que foi submetida a temperaturas próximas de 1200 °C e a temperatura de fusão. Em virtude disso, há um grande crescimento de grão na estrutura austenítica, o mesmo dependerá do tipo de aço e da energia de soldagem, isto é, quanto maior a energia de soldagem, a granulação será mais grosseira. Em geral, esta região tem como característica uma estrutura grosseira, com a ferrita sendo apresentada em forma de placas e com a presença de bainita. Aços ligados ou com maior teor de carbono, podem ter nessa região, uma estrutura martensítica, se a velocidade de resfriamento for maior. Essa região de crescimento de grão tende a ser a mais crítica da ZTA de um aço, pois pode ter pouca tenacidade e, conseqüentemente, ser um local propício a trincas (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).
- Região de refino de grão: região da junta aquecida a temperaturas entre 900 a 1200 °C, essa região tem como característica uma estrutura fina de ferrita e perlita. Também tem resistência e ductilidade elevadas, nos aços microligados (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005) e (WAINER; BRANDI; DE MELLO, 1992).
- Região intercristica: nessa região a temperatura de pico, ocorre na faixa entre 727 °C (temperatura eutetóide) e 900 °C, onde a estrutura original do metal de base sofre uma transformação parcial. Assim, somente uma parte do material é austenitizada e, conseqüentemente, modificado pelo

ciclo térmico. Em algumas situações de soldagem, constituintes de alta dureza e pouca tenacidade podem existir nessa região. As temperaturas inferiores a 727 °C, cujas regiões estão mais afastadas do cordão de solda, as mudanças microestruturais, são imperceptíveis, porém, a resistência mecânica diminui (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005) e (WAINER; BRANDI; DE MELLO, 1992).

A Figura 7 ilustra a estrutura esquemática ZTA de um aço de baixo carbono com essas características. A região A mostra a região de crescimento de grão, B região de refino de grão e C região intercrítica.

Figura 7 - Estrutura esquemática ZTA



Fonte: Marques; Modenesi; Bracarense, (2005)

### 2.2.5 Trincas

São as discontinuidades estruturais mais graves no processo de soldagem, pois são fortes concentradores de tensão, na junta soldada, ocasionando o início da fratura. Ocorre devido à fragilização da junta e mudanças microestruturais durante a soldagem e a presença de hidrogênio.

Assim, a fissuração a frio, ou fissuração pelo hidrogênio é indicada como um dos tipos de formação de trincas mais comuns em aços em que ocorre a formação de martensita. Em aços de maior resistência mecânica, podem ocorrer na ZF, já nos aços carbonos de baixa e média liga, ocorre na ZTA (região de crescimento de grão). Isso significa que os materiais ficam mais sensíveis a essa fissuração,

ocasionando trincas, se o percentual de carbono e ligas aumentarem. Portanto, a equação do carbono equivalente ( $C_{eq}$ ), conforme equação (4), expressa essa sensibilidade do material. O resultado dessa equação mostra que se o  $C_{eq}$  for menor que 0,4, o material é considerado pouco sensível, se for maior que 0,6, o material é considerado muito sensível (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

O carbono equivalente ( $C_{eq}$ ) é utilizado, para analisar a temperabilidade e a soldabilidade do aço, isto é, quanto maior o valor de  $C_{eq}$ , mais temperável e pior será sua soldabilidade (WAINER; BRANDI; DE MELLO, 1992).

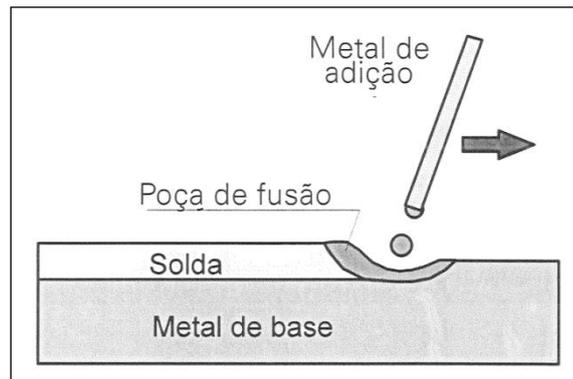
$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Mo}{4} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%Ni}{15} + \frac{\%Cu}{15} + \frac{\%P}{3} \quad (4)$$

### 2.2.6 Processo de Soldagem

A soldagem é o processo de união de metais com a utilização de calor e/ou pressão. É realizada através da fusão de dois materiais, com ou sem a adição de outro material, ou pelo contato dos dois em fase sólida ou semi-sólida (WAINER et al., 1992; MACHADO, 1996). Com isso, alterações das propriedades do material, podem ocorrer na região da junta, isto é, a região onde as peças serão unidas por soldagem. Essas alterações dependem das reações ocorridas durante o processo de solidificação e resfriamento do cordão de solda e de sua microestrutura, visto que o processo de solda depende do calor (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

O processo de soldagem pode ser descrito da seguinte forma: o material da peça que está sendo soldada recebe o nome de metal base, na soldagem por fusão, o material adicional utilizado para a formação da solda, é chamado de metal de adição; durante o processo, todos esses elementos serão fundidos, formando a poça de fusão. Na Figura 8 está ilustrado esse processo.

Figura 8 - Processo de soldagem



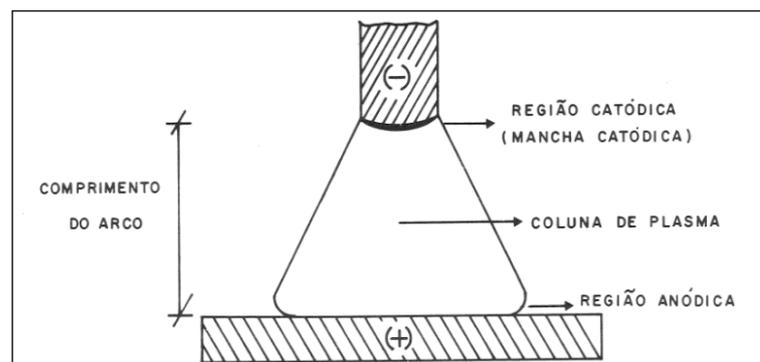
Fonte: Marques; Modenesi; Bracarense, (2005)

### 2.2.7 Arco Elétrico de Soldagem

O arco elétrico é definido através de descargas elétricas, entre dois eletrodos, mantidos através de um gás ionizado, a alta temperatura, conhecido como plasma ao qual gera energia suficiente para a fusão local das peças a serem soldadas (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

Também ocorre quando há a aproximação até o contato com os dois condutores de corrente elétrica e posteriormente separados, com isso, aumenta a resistência ao fluxo de corrente e como resultado a alta temperatura dos eletrodos. O mesmo tem o formato de sino e pode ser dividido em três regiões: região anódica, coluna de plasma, região catódica (mancha catódica), conforme Figura 9.

Figura 9 - Arco elétrico de soldagem

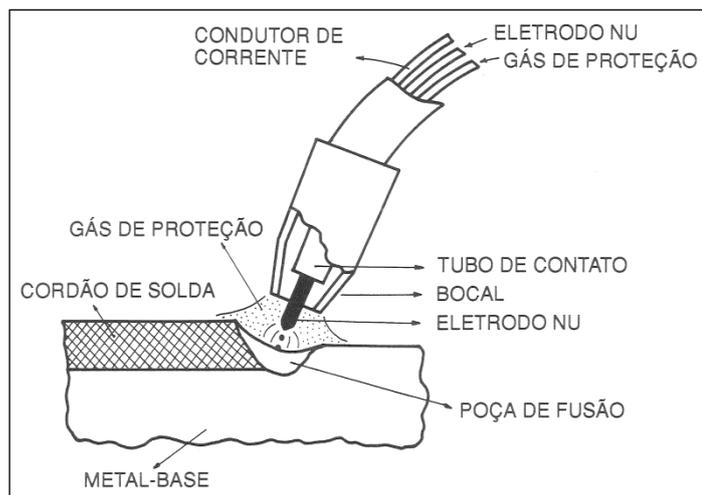


Fonte: adaptado de Wainer, Brandi e Mello (1992)

### 2.2.8 Soldagem GMAW

A soldagem a arco com proteção gasosa GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) consiste na formação do arco elétrico, em um sistema de alimentação constante entre um eletrodo nu consumível e a peça a soldar, formando a poça de fusão (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992; MACHADO, 1996). Essa poça de fusão pode ser protegida de duas maneiras: quando o gás de proteção é inerte e não possui nenhuma interação com a poça de fusão, é chamado MIG (Metal Inert Gas), ou quando o gás de proteção possui alguma atividade física com a poça de fusão, é chamado MAG (Metal Active Gas) (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005). A Figura 10 ilustra a soldagem GMAW.

Figura 10 - Soldagem GMAW



Fonte: adaptado de Wainer, Brandi e Mello (1992)

A soldagem GMAW, é um dos processos de solda, mais empregado nas indústrias. Esta flexibilidade ocorre devido às seguintes características:

- Poucas trincas, pois o metal de solda é colocado com baixo teor de hidrogênio.
- Comparado com o eletrodo revestido, possui maior taxa de deposição e fator de operação.
- Praticidade de operação.
- Aplicabilidade para robotização.

Os eletrodos, usualmente utilizados são os diâmetros de 0,8; 1,0; 1,2 e 1,6 mm, que servem praticamente para todas as ligas ferrosas e não ferrosas. Já os gases de proteção mais utilizados são o argônio, hélio, nitrogênio, hidrogênio,

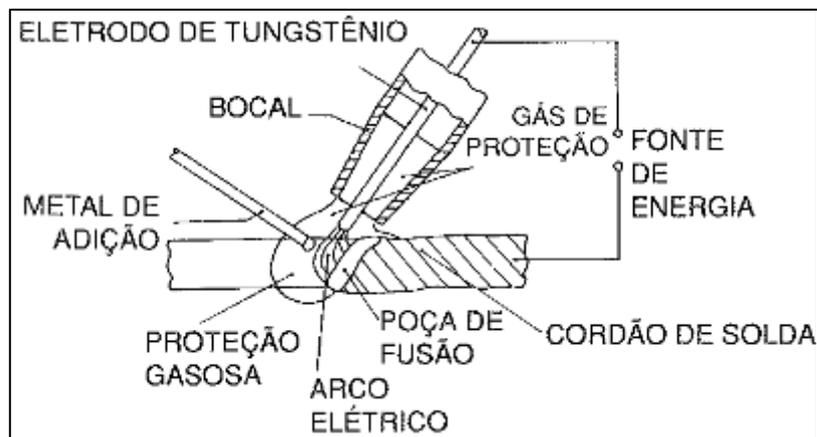
oxigênio e dióxido de carbono. Entretanto, materiais com espessuras inferiores a 0,5 mm, obtiveram sucesso com o processo de soldagem GMAW (exclusivamente MIG). Geralmente podem-se soldar espessuras até 15 mm (MACHADO, 1996).

Porém, possui algumas desvantagens, por exemplo, por ter uma velocidade maior de resfriamento ocasiona mais trincas. Também, a solda em locais de difícil acesso não é possível, pois o bocal da pistola fica próximo do metal base (MACHADO, 1996).

### 2.2.9 Soldagem GTAW

A soldagem GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) é executada através do aquecimento de um arco elétrico entre um eletrodo de tungstênio, não consumível e a peça a soldar. A proteção da poça de fusão é feita por um fluxo de gás inerte. A soldagem pode ser feita adicionando ou não metal de adição (WAINER; BRANDI; DE MELLO, 1992). A Figura 11 mostra a soldagem GTAW, que também é conhecido por TIG (*Tungsten Inert Gas*).

Figura 11 – Soldagem GTAW



Fonte: adaptado de Wainer, Brandi e Mello (1992)

Metais de adição são fornecidos em forma de varetas para soldagem manual e em forma de fios enrolados em bobinas para soldagem mecanizada. Os diâmetros das varetas e dos fios variam entre 0,5 e 5 mm. Eletrodos mais comuns são de tungstênio puro, ou com adição de óxido de cério, lantânio, tório ou zircônio. E os gases de proteção mais comuns são o argônio, o hélio e suas respectivas misturas (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

A soldagem GTAW é principalmente utilizada, em casos em que o calor cedido à peça é controlado; e também quando a qualidade da junta soldada é mais importante que seu custo de produção, pois é um processo caro, lento e de baixa produtividade. Em virtude disso, é usado na soldagem de peças com espessuras pequenas, entre 1 a 2 mm.

As principais vantagens são:

- soldas de alta qualidade;
- soldagem de grande parte dos metais e ligas;
- fonte de calor concentrada, minimizando a ZTA e distorções;
- praticidade de operação.

Também, esse processo possui algumas desvantagens, as quais são:

- não é possível em locais com fluxo de ar;
- na região soldada, pode haver inclusão de tungstênio;
- intensa radiação ultravioleta.

Entretanto, a escolha dos parâmetros para a soldagem GTAW, depende do material a ser soldado, da espessura da peça, e do uso ou não do metal de adição (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

### 2.3 ARTIGOS RELACIONADOS AO TEMA

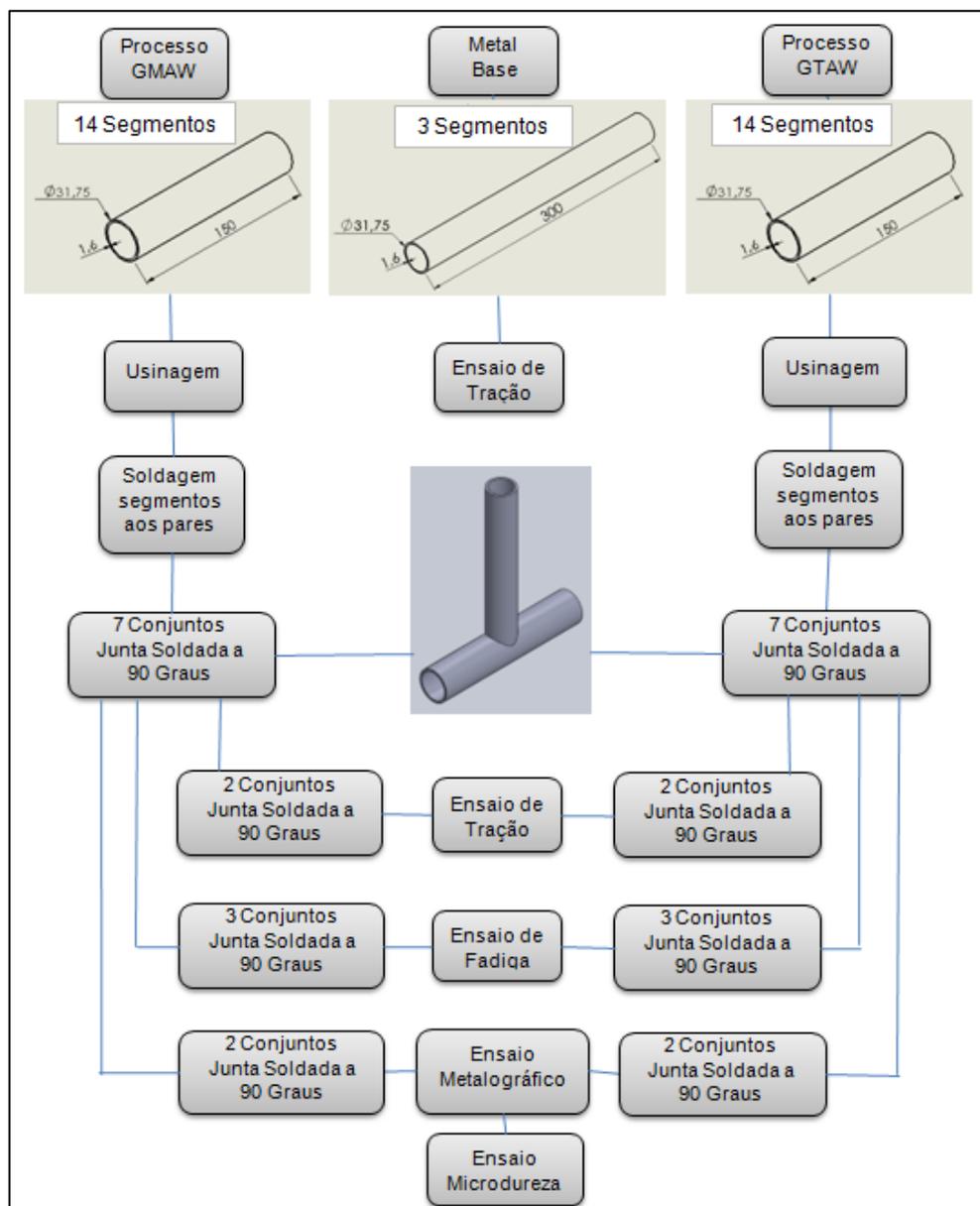
Carrupt et al. (2017) realizaram um estudo na estrutura conhecida como “berço de motor” que compõem aeronaves de pequeno porte. Essa estrutura está submetida a carregamentos, cujas fraturas ocasionadas por fadiga são comuns. Nesse estudo, identificou as fases presentes na microestrutura da junta soldada em aço ABNT 4130 e suas características mecânicas, destinadas à produção dessa estrutura. Os ensaios realizados foram de tração, microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura. De acordo com os ensaios, os resultados mostraram a formação de fases frágeis e uma grande alteração nas propriedades mecânicas da junta soldada, comparado com o material.

Nascimento et al. (2012), realizaram um estudo, sobre o efeito de até três reparos de solda por soldagem a arco de gás de tungstênio (GTAW) sobre a resistência à fadiga axial do aço AISI 4130 usado em uma estrutura crítica para a segurança de vôo. Os resultados obtidos indicaram que a resistência à fadiga axial diminuiu com o próprio processo GTAW e com os subseqüentes ciclos de reparo, como consequência de alterações microestruturais e de microdureza e de fatores de geometria do perfil de solda, que induziram alta concentração de tensão no cordão de solda.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Com o objetivo de avaliar o comportamento da solda no aço SAE 4130, foram soldadas juntas a 90 graus, pelos processos de soldagem GMAW e GTAW. Após esses processos de soldagem, serão realizados os seguintes ensaios na ordem: tração, fadiga, metalográfico e microdureza. Nos ensaios de tração e fadiga, os desvios padrões foram determinados a partir dos resultados médios da tensão de escoamento e tensão de ruptura. A Figura 12 ilustra o fluxograma de atividades desenvolvido.

Figura 12 – Fluxograma de atividades



Fonte: Autor (2019)

### 3.1 MATERIAL ANALISADO

O material analisado consiste em tubos de aço de ultra-alta resistência SAE 4130. As dimensões dos tubos são 31,75 mm de diâmetro externo e 28,55 mm de diâmetro interno, ao qual resulta numa parede de 1,60 mm.

Na Tabela 4, tem-se a composição química do aço SAE 4130, conforme certificado do fornecedor, já na Tabela 5, encontram-se as propriedades mecânicas no estado normalizado.

Tabela 4 – Composição química do aço SAE 4130

AISI-SAE	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	V	Nb	Ti
4130	0,3	0,51	0,007	0,001	0,19	0,94	0,02	0,21	0,029	0,01	0,002	0,002	0,001

Fonte: certificado de inspeção, VALLOUREC (2018).

Tabela 5 - Propriedades mecânicas do aço SAE 4130 - normalizado

Temperatura (°C)	Resistência a Tração (MPa)	Tensão de Escoamento (MPa)	Alongamento em 50mm (%)	Redução em área (%)	Dureza (HB)
870	668,8	436,4	25,5	59,5	197

Fonte: adaptado de Gall; Boyer, (1985)

Para saber se o material deverá sofrer um pré-aquecimento antes de soldar, deve-se obter o valor do carbono equivalente ( $C_{eq}$ ). Aplicando a equação (3), obtêm-se:

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Mo}{4} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%Ni}{15} + \frac{\%Cu}{15} + \frac{\%P}{3}$$

$$C_{eq} = 0,30 + \frac{0,51}{6} + \frac{0,21}{4} + \frac{0,94}{5} + \frac{0,02}{15} + \frac{0,01}{15} + \frac{0,007}{3} = 0,629$$

Com esse resultado, o aço analisado deveria sofrer um pré-aquecimento, antes do processo de soldagem, pois o valor do ( $C_{eq}$ ) foi superior a 0,6 (GUERRA, 1996), mas não foi possível. Porém, níveis de carbono equivalente maiores que 0,6 facilitam o surgimento de trincas a frio, reduzindo a qualidade da junta soldada.

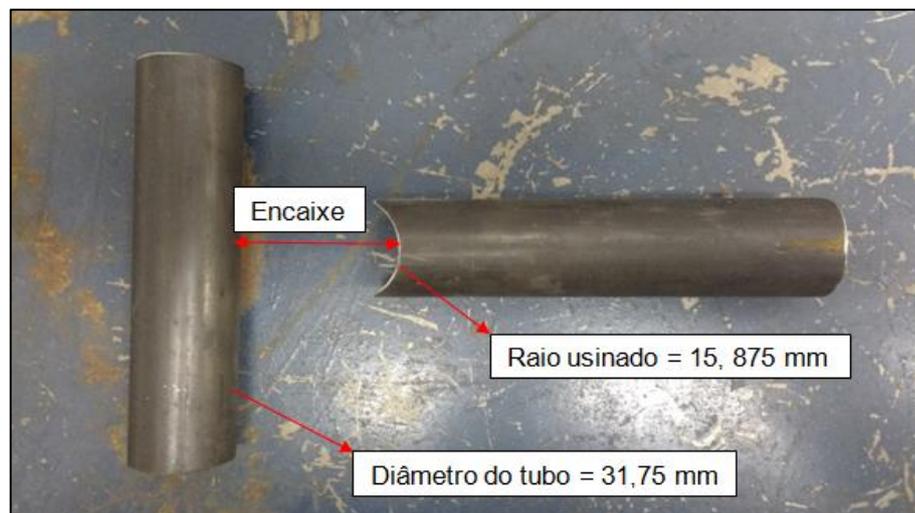
## 3.2 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Ao todo foram cortados 31 segmentos tubulares (ST), numa serra. Sendo que, 28 com comprimento de 150 mm, para posterior soldagem desses segmentos aos pares, (14 para o processo GMAW e 14 para o processo GTAW) e 3 com comprimento de 300 mm para o metal base. Após a soldagem foram obtidos 7 corpos de prova (CP), isto é, conjuntos de junta soldada a 90 graus para cada processo de soldagem, conforme já lustrado na Figura 12.

### 3.2.1 Usinagem

Com o intuito de manter um perfeito encaixe entre os segmentos tubulares, metade dos tubos foi usinada nas suas extremidades, com o raio do tubo, ou seja, com a medida de 15,875 mm, numa fresadora convencional. Essa usinagem auxiliou no perpendicularismo entre as peças, facilitando posteriormente o processo de soldagem da junta. A Figura 13, ilustra essa usinagem e também o posterior encaixe antes da solda.

Figura 13 - Usinagem na extremidade do tubo



Fonte: Autor (2019)

## 3.3 SOLDAGEM

Os processos de soldagem GMAW e GTAW foram realizados no laboratório

da Universidade de Caxias do Sul, por um dos integrantes da equipe Bajagual, que participa do programa Baja SAE. Os segmentos tubulares foram soldados aos pares, resultando num total de 7 CP de cada processo. A máquina utilizada para a solda foi da empresa Lincoln Electric, modelo Speedtec 500 SP. Nessa máquina, pôde-se soldar os dois processos. A Figura 14 ilustra a máquina de solda.

Em ambos os processos, GMAW e GTAW, tanto a fixação das peças como a soldagem foram feitos manualmente. Para fixação das peças utilizou-se uma morsa e a soldagem da junta, dependeu da habilidade do operador. Os parâmetros para a solda foram coletados, fazendo pré-testes em tubos, até se ter uma solda visualmente boa.

Figura 14 - Máquina utilizada para solda

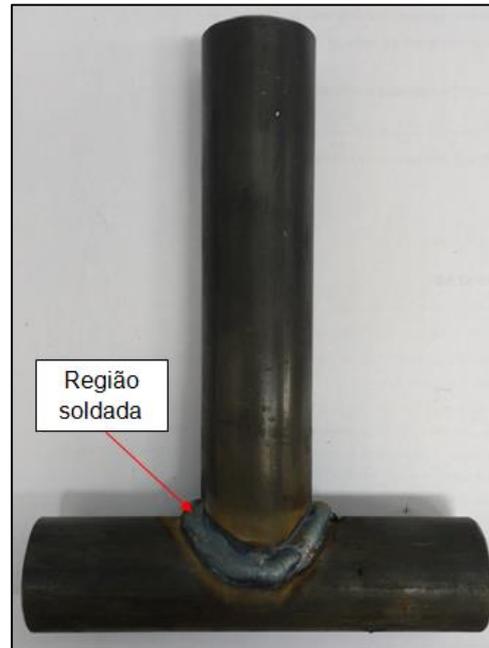


Fonte: Autor (2019)

### 3.3.1 Métodos e Parâmetros GMAW

Para o processo de soldagem GMAW, o arame eletrodo utilizado foi o AWS ER70-S com diâmetro de 1 mm. O gás de proteção foi uma mistura de gases que teve em sua composição 85% de argônio e 15% de gás carbônico. A região soldada tem um perímetro = 121,3 mm e o tempo de operação de solda, para cada corpo de prova, foi de 90 segundos. A Figura 15 ilustra o corpo de prova GMAW.

Figura 15 – CP GMAW



Fonte: Autor (2019)

Para calcular a velocidade e energia de soldagem, foi utilizada a Equação (2) e Equação (1), respectivamente. O rendimento térmico considerado é de 0,75 conforme visto na Tabela 3. Os parâmetros calculados e utilizados para a soldagem dos corpos de prova estão mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros soldagem GMAW

<b>Corrente (A)</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Rendimento térmico (-)</b>	<b>Vazão do gás de proteção (L/min)</b>	<b>Velocidade de soldagem (mm/s)</b>	<b>Tempo de soldagem (s)</b>	<b>Energia de soldagem (J/mm)</b>
114,00	13,60	0,75	18,00	1,35	90,00	861,34

Fonte: Autor (2019)

### 3.3.2 Métodos e Parâmetros GTAW

Para o processo de soldagem GTAW, o material de adição (arame) utilizado foi o AWS ER70-S com diâmetro de 1,6 mm. O eletrodo utilizado possui em sua composição 2% de Tório e diâmetro de 2,4 mm. O gás de proteção teve em sua composição 100% de argônio. A região soldada também tem um perímetro = 121,3 mm e o tempo de operação de solda, para cada corpo de prova, foi de 210

segundos. A Figura 16 ilustra o corpo de prova GTAW.

Figura 16 – CP GTAW



Fonte: Autor (2019)

Para calcular a velocidade e energia de soldagem, foi utilizada a Equação (2) e Equação (1), respectivamente. O rendimento térmico considerado é de 0,65 conforme visto na Tabela 3. Os parâmetros calculados e utilizados para a soldagem dos corpos de prova estão mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros soldagem GTAW

<b>Corrente (A)</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Rendimento térmico (-)</b>	<b>Vazão do gás de proteção (L/min)</b>	<b>Velocidade de soldagem (mm/s)</b>	<b>Tempo de soldagem (s)</b>	<b>Energia de soldagem (J/mm)</b>
94,00	9,10	0,65	14,00	0,58	210,00	958,64

Fonte: Autor (2019)

### 3.4 ENSAIO DE TRAÇÃO

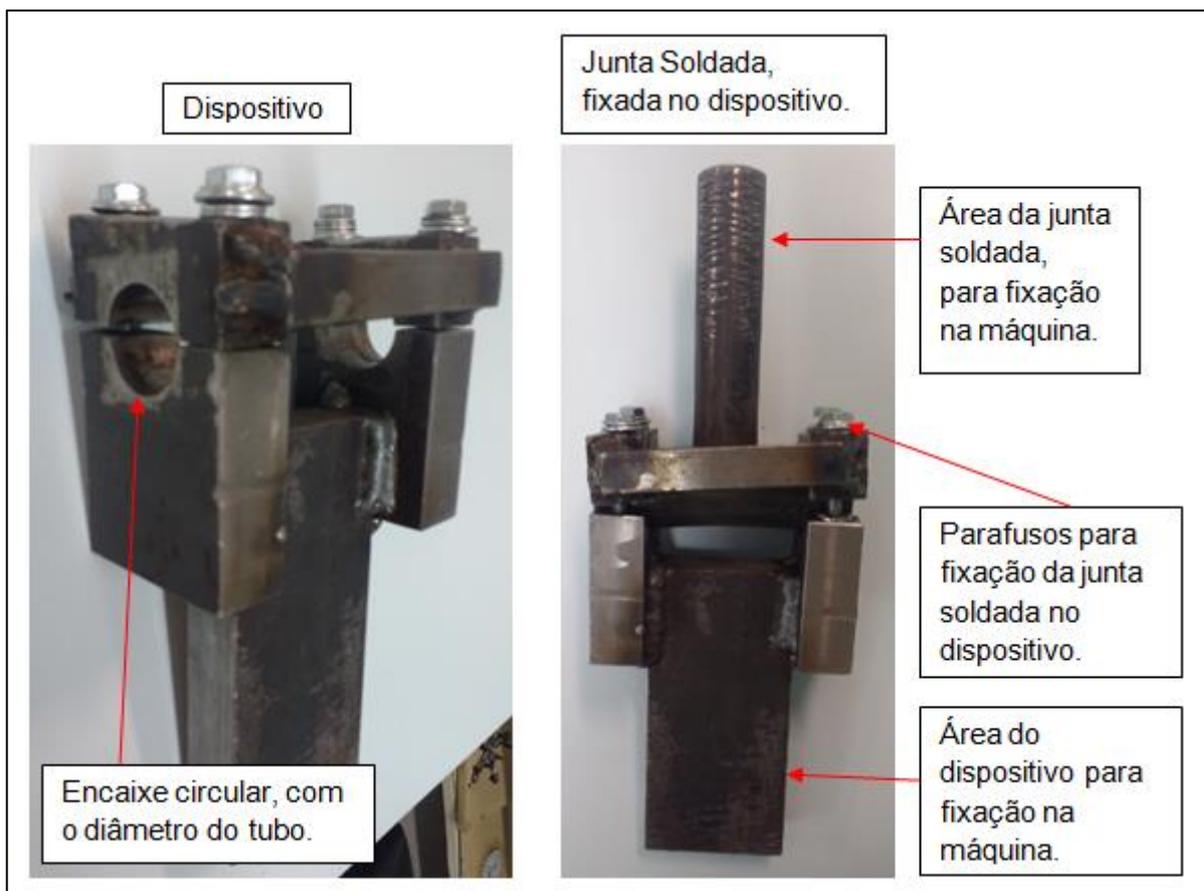
O ensaio de tração foi realizado com o objetivo de verificar e analisar as propriedades mecânicas do aço SAE 4130, em duas situações, nos corpos de prova e no metal base. No metal base, para comparar as propriedades mecânicas ensaiadas, com as do certificado de inspeção. Já nos corpos de prova, para

averiguar qual era o limite de escoamento.

Para o ensaio de tração no metal base, a norma adotada foi ASME IX (2007) e a máquina utilizada foi a de ensaio de tração, modelo EMIC DL 20000. Para os corpos de prova à norma adotada foi ASTM A370-14 e a máquina utilizada foi a de ensaio de tração universal, modelo ZD 100. Dos 14 CP soldados, 4 foram destinados para o ensaio de tração, ou seja, 2 CP para o processo GMAW e 2 CP para o processo GTAW.

Entretanto, para realizar o ensaio de tração nos corpos de prova, foi necessário o desenvolvimento de um dispositivo, para a fixação deles na máquina de tração. Esse mesmo dispositivo foi utilizado posteriormente, para o ensaio de fadiga. A Figura 17 ilustra o dispositivo e a fixação dos corpos de prova.

Figura 17 – Dispositivo e fixação dos CP



Fonte: Autor (2019)

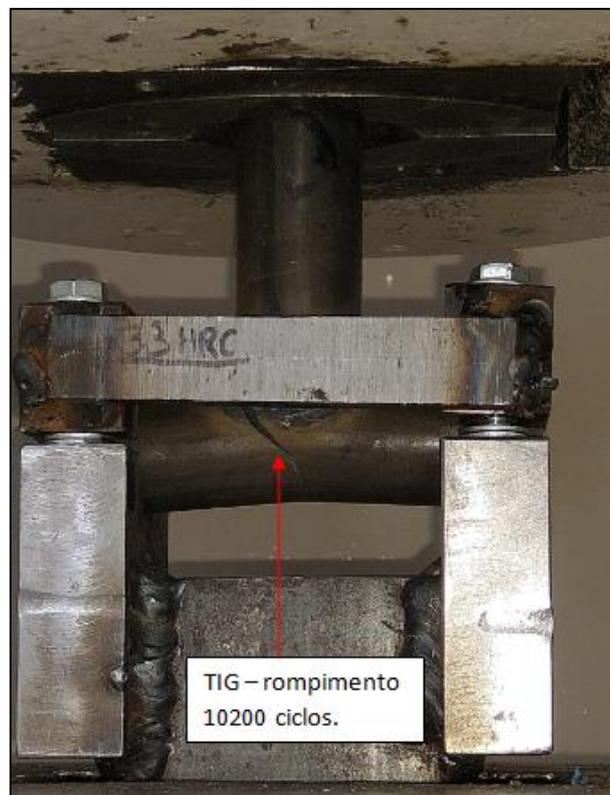
### 3.5 ENSAIO DE FADIGA

O ensaio de fadiga teve como objetivo averiguar quantos ciclos a junta soldada suportaria com uma carga até romper. Onde a amplitude da carga foi de 1500 kgf, isto é, teve uma carga mínima de 2500 kgf e máxima de 4000 kgf e a frequência de 400 ciclos por minuto.

O valor para a carga máxima foi definido após ser realizado o ensaio de tração das juntas soldadas obtendo o limite de escoamento. Através dele o valor da carga estipulada é aproximadamente 16,5% a menos do limite de escoamento obtido. Já a amplitude foi definida em função de limitação da máquina, para poder gerar os resultados. Já o valor da frequência foi a capacidade máxima da máquina.

Como dito anteriormente, o mesmo dispositivo usado para o ensaio de tração, foi utilizado para esse ensaio. A Figura 18 mostra como exemplo, a fixação da junta soldada na máquina universal de tração modelo ZD 100 e o ensaio pelo processo TIG, até o seu rompimento com 10200 ciclos. Foram destinadas 6 juntas soldadas para esse ensaio, onde 3 foram para o processo GMAW e 3 para o processo GTAW.

Figura 18 – Ensaio de fadiga – junta soldada GTAW



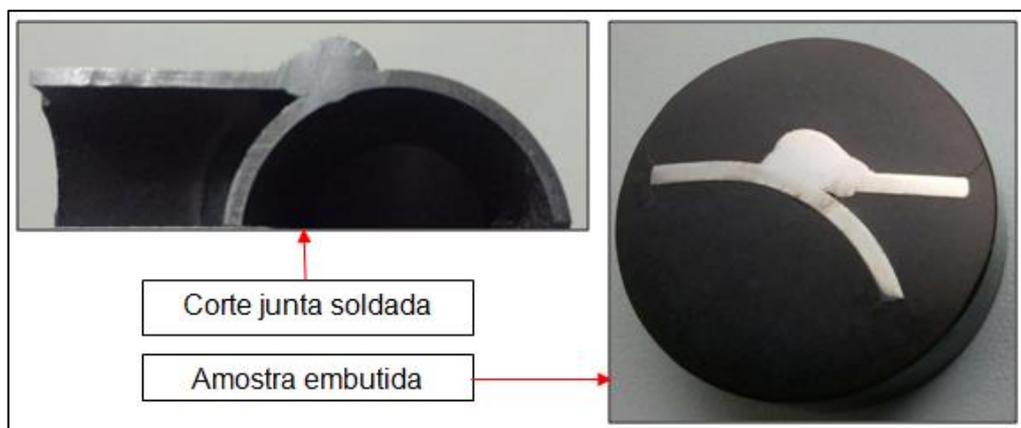
Fonte: Autor (2019)

### 3.6 ENSAIO METALOGRÁFICO

O ensaio metalográfico, foi realizado no laboratório de micrografia, da Universidade de Caxias do Sul, conforme norma ABNT NBR 13284. Para as análises macrográficas e micrográficas as juntas soldadas foram cortadas perpendicularmente na região da solda, na máquina de corte metalográfica, marca Metalotest, modelo Maxicut. Após as seções cortadas foram embutidas a quente, numa embutidora à quente, marca Resitec, modelo RS-30. A matéria prima para o embutimento das amostras foi o bakelit marron Resin 6, da marca Struers.

Com as amostras embutidas, foram lixadas na bancada de lixamento manual, da marca Solotest, com as lixas d' água de granulometria: 150, 240, 320, 400, 600 e 1200. E para finalizar, as seções foram polidas, com pano de polimento e pasta diamantada de 3 microns, na máquina politriz, modelo Maxiplan. A Figura 19 ilustra a preparação das amostras para o ensaio metalográfico.

Figura 19 – Preparação das amostras para ensaio metalográfico



Fonte: Autor (2019)

Para análise micrográfica, foi definido 6 regiões, conforme ilustra Figura 20:

A – Metal base.

B – Zona de transição entre metal base e ZTA.

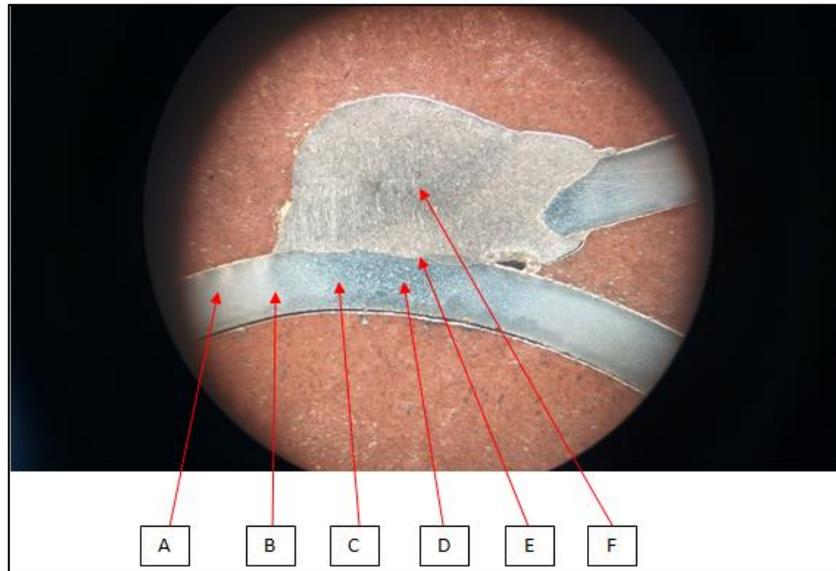
C – ZTA 1.

D – ZTA 2.

E – Zona de transição entre ZTA e zona fundida.

F – Zona fundida

Figura 20 – Regiões de análise micrográfica



Fonte: Autor (2019)

No ensaio micrográfico, foi utilizado o microscópio metalográfico óptico, marca Opton. O estereoscópico, marca Kuntrol, modelo KET 300, foi utilizado para o ensaio macrográfico. Foram embutidas 8 amostras, porém para análise micrográfica e macrográfica, foi considerado a amostra que obteve a ZTA de maior tamanho em cada processo.

### 3.7 ENSAIO MICRODUREZA VICKERS

O ensaio de Microdureza Vickers foi realizado conforme norma ABNT NBR NM ISO 6507-1. As mesmas amostras do ensaio metalográfico, foram utilizadas. A máquina utilizada para as leituras de durezas das amostras foi o microdurômetro digital, marca Future – Tech Corp, modelo FLL – 50V. Utilizando uma carga de 500 gramas, durante 10 segundos, com início no metal base até a zona fundida, foi possível adquirir os perfis de dureza. Foram realizadas 12 medições, 6 para solda GMAW e 6 para solda GTAW.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ENSAIO DE TRAÇÃO

Como mencionado na seção 3.4, foram destinados 4 conjuntos, 2 do processo GMAW e 2 do processo GTAW. Os resultados foram analisados fazendo uma média entre as duas amostras de cada processo. Já para o ensaio de tração no metal base, foram destinados 3 segmentos tubulares e os resultados também foram analisados fazendo uma média.

#### 4.1.1 Ensaio de tração no metal base (MB)

Com o objetivo de conferir e comparar a tensão de escoamento do aço SAE 4130, com o certificado de inspeção, três amostras, tubos, foram enviadas para o ensaio. A Tabela 8 mostra os resultados e o gráfico da Figura 21 ilustra a comparação da tensão de escoamento com o certificado de inspeção. O gráfico da Figura 22 mostra a comparação com a tensão de ruptura e o certificado de inspeção.

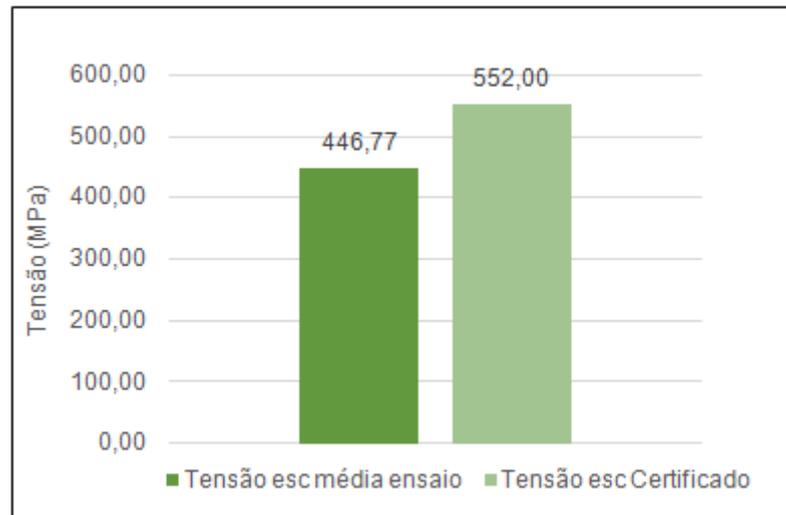
Analisando os gráficos, pode-se perceber que a tensão de escoamento do metal base ensaiado, teve um valor bem abaixo da tensão de escoamento do certificado de inspeção, com diferença de 105 MPa. Portanto escoou bem antes do previsto. Já a tensão de ruptura os valores ficaram próximos ao valor teórico, pois o certificado não informava. Houve uma pequena diferença de aproximadamente 5 MPa.

Tabela 8 – Resultados das tensões do ensaio de tração MB

Tubo	Força de Escoamento		Tensão de Escoamento (MPa)	Força de Ruptura		Tensão de Ruptura (MPa)
	(N)	(kgf)		(N)	(kgf)	
1	68042	(6936)	448,97	104339	(10636)	688,48
2	67433	(6874)	444,96	101013	(10297)	666,54
3	67649	(6896)	446,39	101043	(10300)	666,73
Média	67708	(6902)	446,77	102131	(10411)	673,92

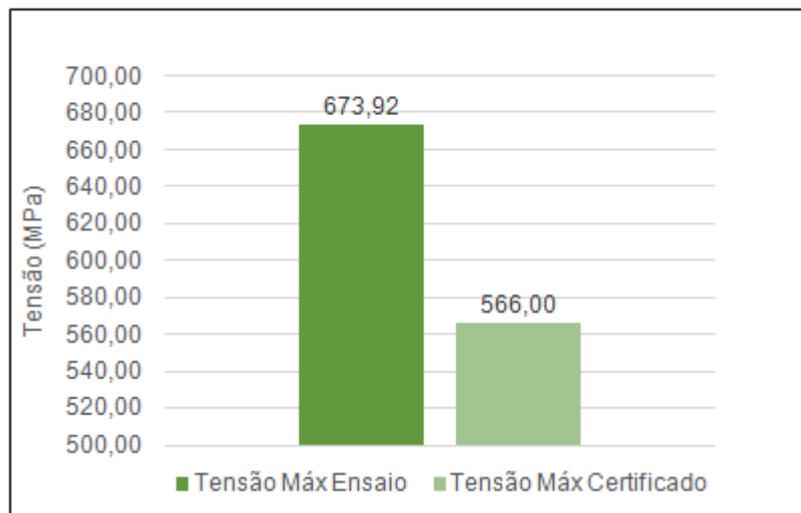
Fonte: Autor (2019)

Figura 21 – Tensão de escoamento ensaio de tração MB x certificado



Fonte: Autor (2019)

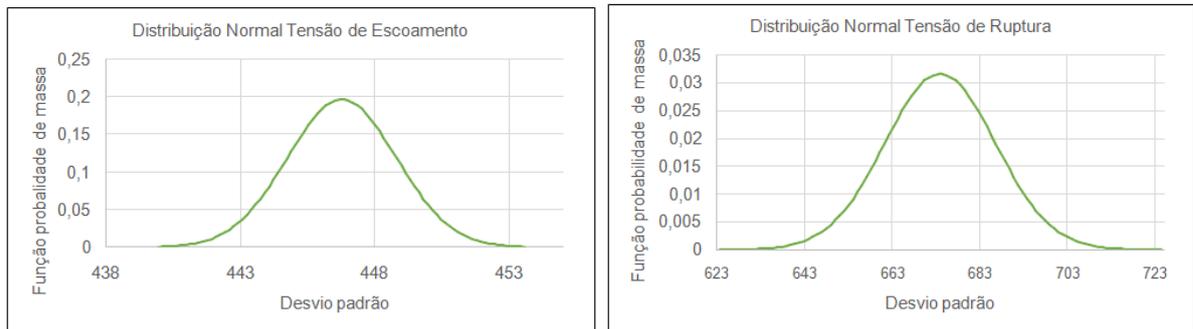
Figura 22 - Tensão de ruptura ensaio de tração MB x certificado



Fonte: Autor (2019)

A Figura 23 mostra o desvio padrão para simulação em uma amostragem com 100 peças, nota-se que para a tensão de ruptura o desvio padrão foi maior, mostrando que o processo GTAW, tenderia a romper antes, se tivesse mais amostras.

Figura 23 – Desvio padrão tensão de escoamento x tensão de ruptura



Fonte: Autor (2019)

#### 4.1.2 Ensaio de tração Junta soldada

A Tabela 9 mostra o resultado do ensaio de tração das juntas soldadas. A Figura 24 ilustra o gráfico da tensão de escoamento e a Figura 25 ilustra o gráfico da tensão de ruptura, de cada junta soldada.

Nota-se que os valores das tensões de escoamento e tensão de ruptura ficaram bem abaixo dos valores encontrados no ensaio de tração do metal base. Isso pode ter ocorrido, porque o lote de peças inspecionadas do metal base poderia não estar com uma qualidade boa, interferindo nos resultados.

Nesse ensaio, pode-se observar que a tensão de escoamento e a tensão de ruptura, no processo GMAW, foram superiores ao processo GTAW. Todas as juntas que foram soldadas pelo processo GMAW, romperam no metal base, comprovando a boa soldabilidade, sem ocorrer falta de fusão e penetração na solda. A Figura 26 mostra as regiões onde romperam as juntas no processo GMAW e GTAW.

Também, os resultados da tensão de escoamento e tensão de ruptura nas amostras GMAW, tiveram uma diferença de 0,33% e 8% respectivamente. A diferença foi maior nas amostras GTAW, onde a tensão de escoamento obteve uma diferença de 2,2% e a tensão de ruptura 7,1%.

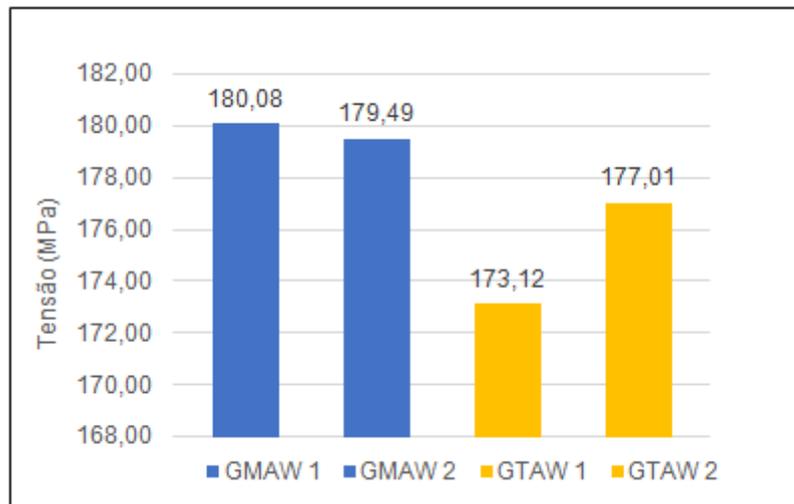
A Figura 27 e a Figura 28 nos mostra o gráfico das tensões médias de escoamento e o gráfico das tensões médias de ruptura, respectivamente, das amostras nos dois processos, com os seus desvios padrões (linhas acima da barra). Pode-se perceber que o desvio padrão no processo GTAW, obteve intervalos maiores, podendo os resultados alcançar os valores obtidos no processo GMAW. Portanto a diferença de valores de tensão entre as amostras são insignificantes, pois há pouca diferença.

Tabela 9 - Resultado ensaio de tração juntas soldadas

Processo	Força de Escoamento		Tensão de Escoamento (MPa)	Força de Ruptura		Tensão de Ruptura(MPa)
	(N)	(kgf)		(N)	(kgf)	
GMAW 1	47715	(4864)	180,08	70632	(7200)	266,67
GMAW 2	47560	(4848)	179,49	76518	(7800)	288,78
GTAW 1	45871	(4676)	173,12	71613	(7300)	270,27
GTAW 2	46901	(4781)	177,01	66708	(6800)	251,76

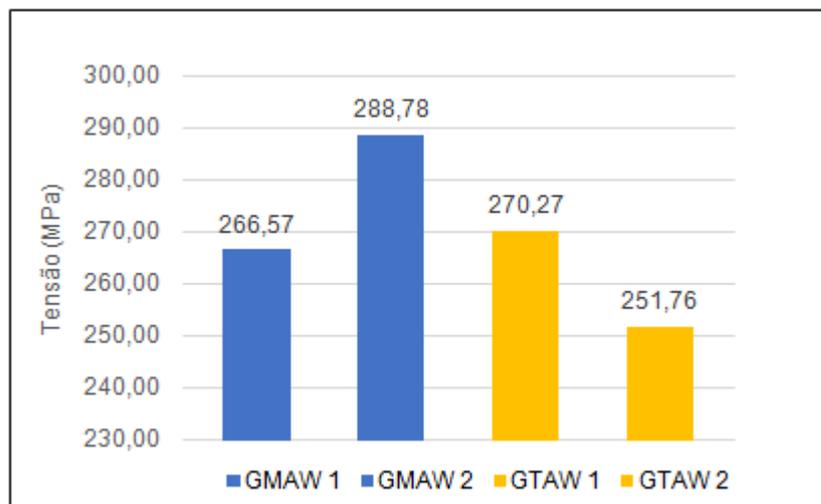
Fonte: Autor (2019)

Figura 24 – Tensão de escoamento juntas soldadas



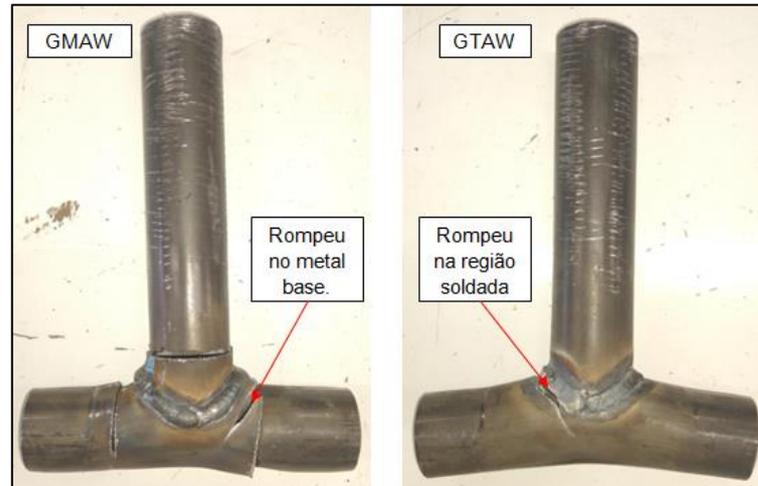
Fonte: Autor (2019)

Figura 25 – Tensão de ruptura juntas soldadas



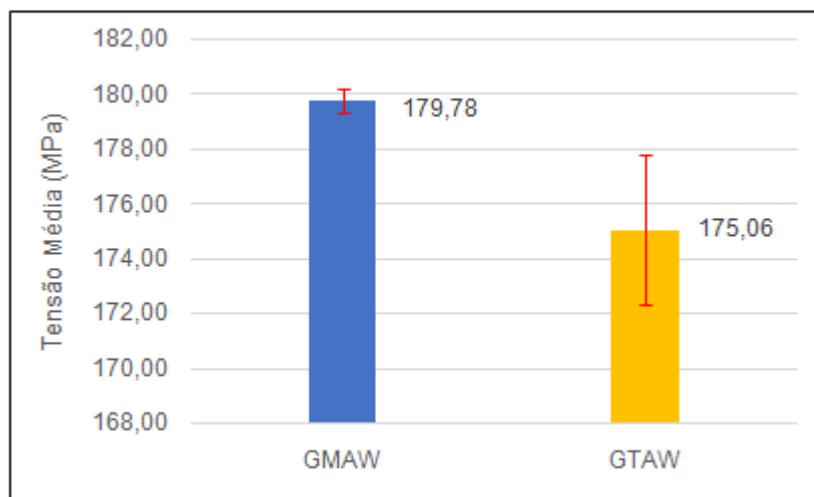
Fonte: Autor (2019)

Figura 26 – Regiões de rompimento GMAW e GTAW



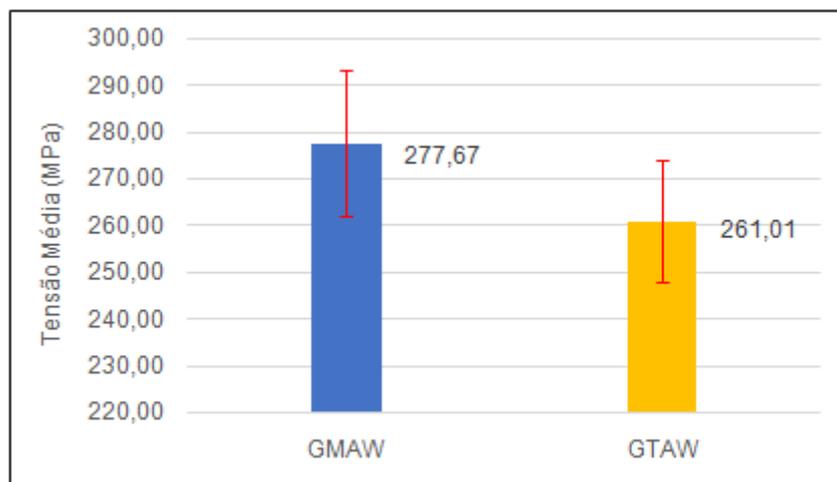
Fonte: Autor (2019)

Figura 27 – Tensão de escoamento com desvio padrão



Fonte: Autor (2019)

Figura 28 – Tensão de ruptura com desvio padrão



Fonte: Autor (2019)

## 4.2 ENSAIO DE FADIGA

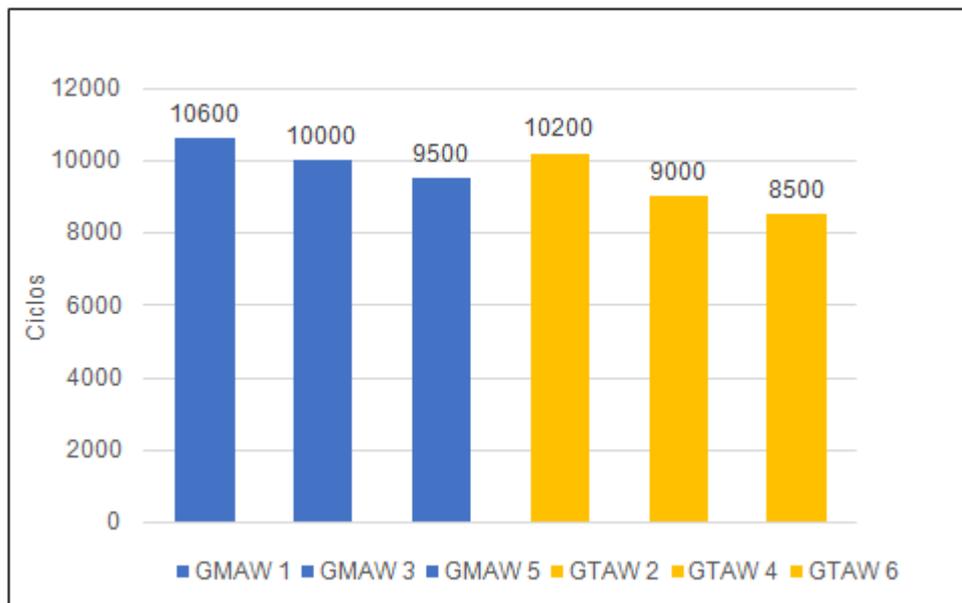
Conforme mencionado na seção 3.5, foram destinados 6 conjuntos, 3 para o processo GMAW e 3 para o processo GTAW. A Tabela 10 mostra o resultado do ensaio de fadiga das juntas soldadas. O gráfico da Figura 29 ilustra a quantidade de ciclos (mil) que suportou cada amostra.

Tabela 10 - Resultado ensaio de fadiga juntas soldadas

CP	Ciclos
GMAW 1	10600
GMAW 3	10000
GMAW 5	9500
GTAW 2	10200
GTAW 4	9000
GTAW 6	8500

Fonte: Autor (2019)

Figura 29 - Fadiga de juntas soldadas



Fonte: Autor (2019)

Analisando o gráfico pode-se afirmar que no processo GMAW, o CP “GMAW 1”, foi o CP que mais ciclos suportou até romper, ou seja, 10600 ciclos. Isso porque, rompeu no metal base, não fragilizando a região soldada. Essa afirmação comprovou-se fazendo uma análise estatística, através do gráfico de distribuição normal “Teste T” (Student) que comprovou com 95% de confiança, se tivesse mais

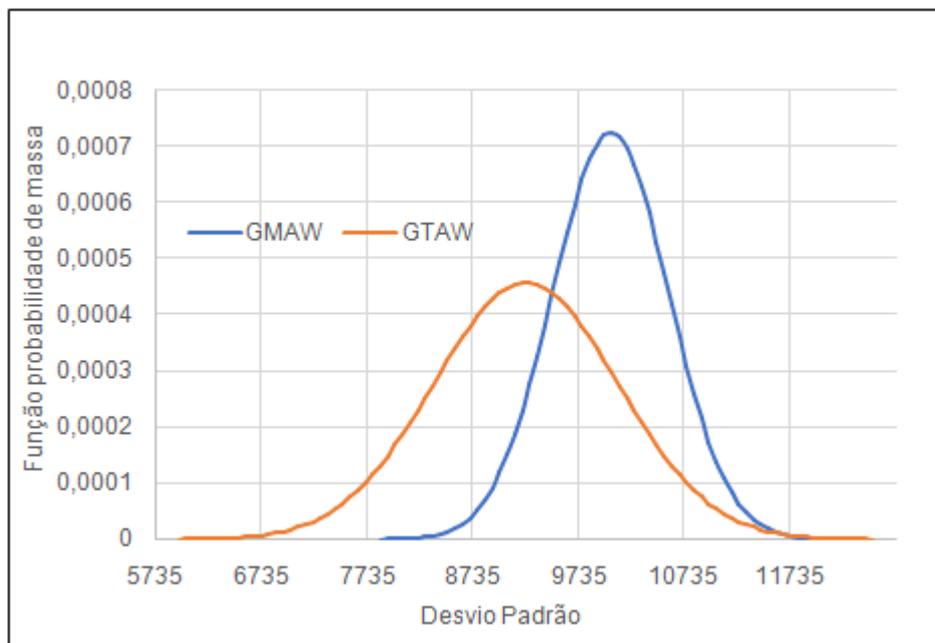
amostras, o processo GMAW continuaria a suportar mais ciclos para essa situação. A Figura 30 ilustra esse gráfico.

Porém, é importante observar, que ao analisar a região fraturada, havia falta de fusão entre o metal depositado e o metal base, o que pode ter ocorrido devido à energia de soldagem ser insuficiente (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

Outra amostra que mais suportou a fadiga, foi no processo GTAW, o CP “GTAW 2”, com 10200 ciclos. Mas, ao analisar a região fraturada, houve mordeduras, que é a fusão do metal base na margem do cordão de solda, isto é, no limite entre o cordão de solda e o metal base, podendo ter ocorrido devido à corrente ou velocidade de soldagem ser elevadas (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

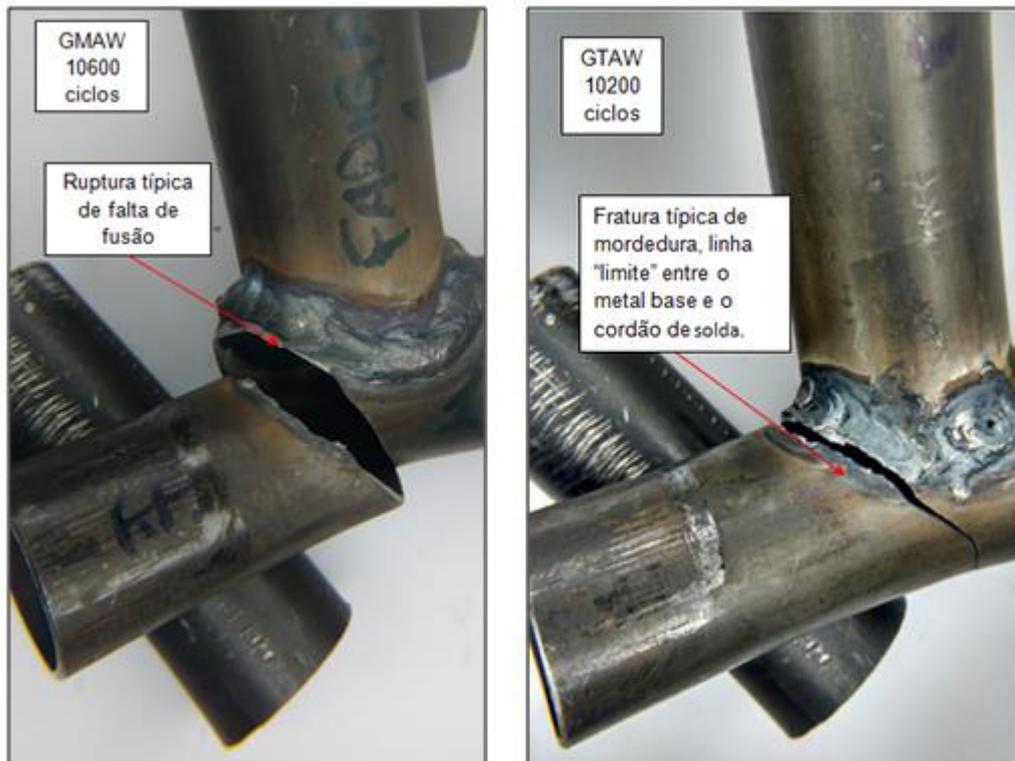
Vale lembrar, que nesse ensaio, as amostras restantes, romperam no metal base e também tiveram características parecidas, não havendo necessidade de mostrar a fratura em todas as amostras. A Figura 31 ilustra a junta GMAW e GTAW com as suas características de fratura.

Figura 30 - Distribuição normal “Teste T” - Fadiga



Fonte: Autor (2019)

Figura 31 – Regiões fraturadas GMAW e GTAW



Fonte: Autor (2019)

### 4.3 ENSAIO METALOGRAFICO

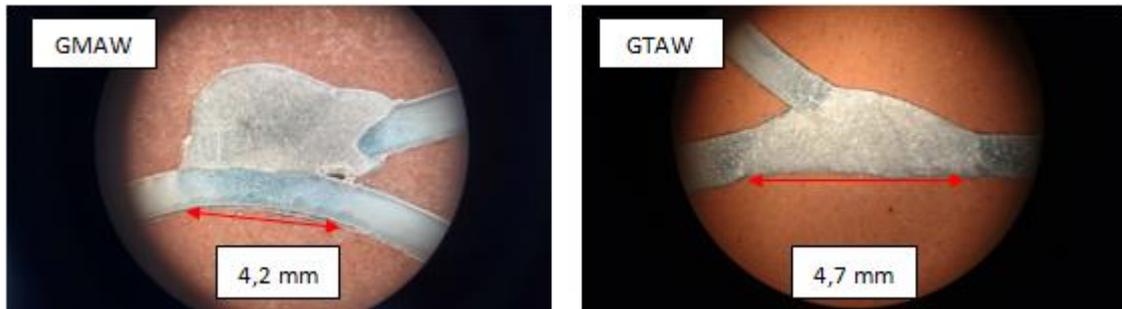
#### 4.3.1 Macrografia

Para realizar o ensaio macográfico, levaram-se em conta, as amostras que tiveram a maior ZTA, uma para o processo GMAW e outra para o processo GTAW. Isso porque quanto maior a ZTA, maior a resistência da solda. As fotos foram tiradas através de microscopia ótica.

A Figura 32 mostra o comprimento da ZTA, nos dois processos GMAW e GTAW. No processo GMAW, pode-se observar que houve pouca fusão com o metal base. Já o processo GTAW, percebe-se que houve penetração total na união da junta.

Nota-se que o comprimento da ZTA no processo GTAW, foi maior que o comprimento da ZTA do processo GMAW, isso ocorreu, porque a energia de soldagem, no processo GTAW é mais elevada. A energia calculada para o GTAW tem um valor de 958,54 J/mm e a do GMAW 861,34J/mm.

Figura 32 – Macrografia das juntas soldadas



Fonte: Autor (2019)

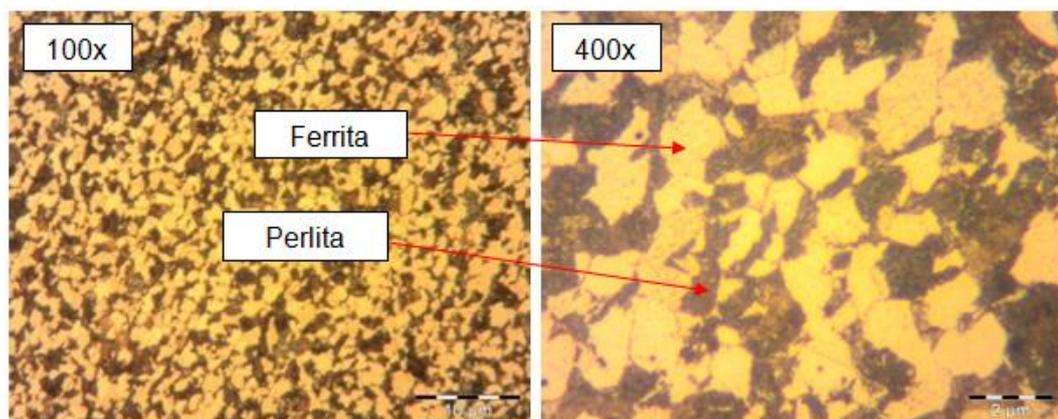
### 4.3.2 Micrografia

Com o ensaio de micrografia, observaram-se as microestruturas desde o metal base até a zona fundida. As figuras abaixo estão separadas por região, conforme já visto na Figura 20, para um melhor entendimento das microestruturas. Também foi identificada a qual processo elas pertencem, isto é, GMAW ou GTAW. As figuras resultam de ampliações de 100x e 400x, respectivamente.

#### 4.3.2.1 Região A: Metal Base

A Figura 33 representa a microestrutura do metal base. Tem ferrita e perlita na sua composição, os grãos de ferrita, apresentam-se alongados, então conclui-se que o resfriamento da solda foi rápido. Como foram utilizados os mesmos parâmetros de soldagem para os dois processos, essa figura é comum a ambos os processos.

Figura 33 – Região A: metal base

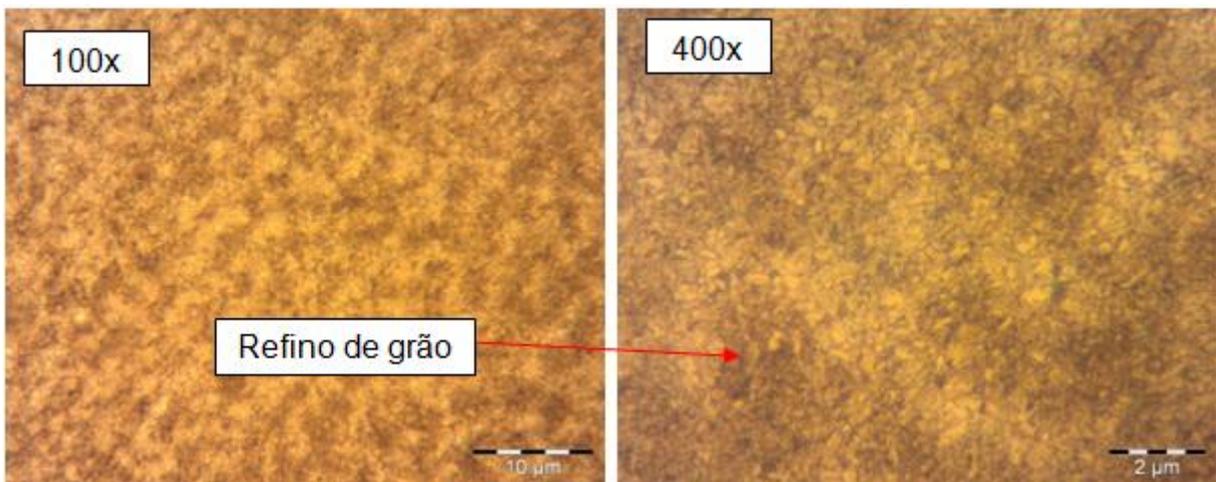


Fonte: Autor (2019)

#### 4.3.2.2 Região B: zona de transição entre MB e ZTA

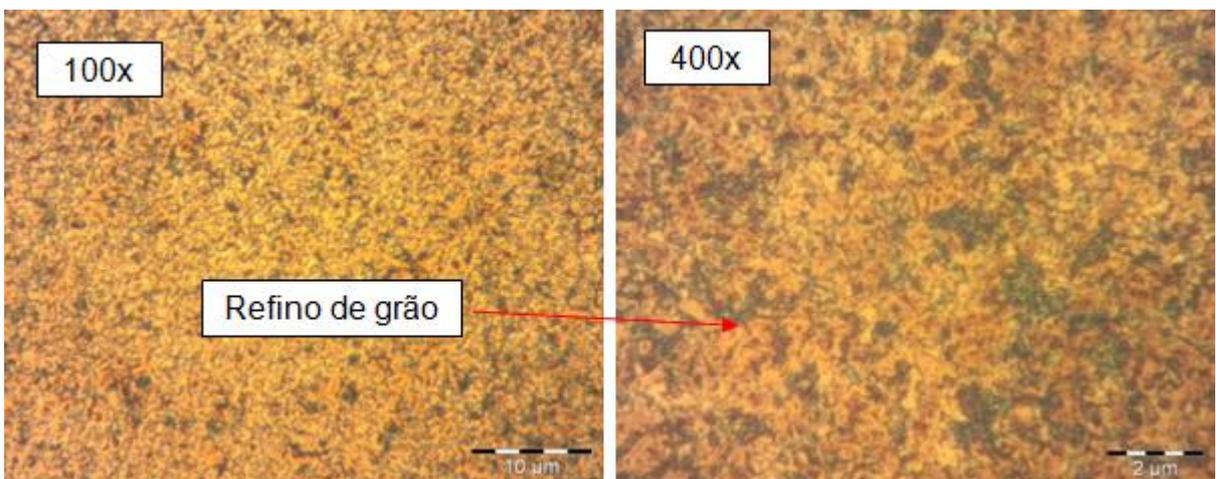
A Figura 34, representa a transição entre o MB e ZTA, começando a aparecer a região de refino de grão, para amostra GMAW e a Figura 35 para amostra GTAW. Nessa região tem-se resistência e ductilidade elevadas (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Figura 34 – Região B: zona de transição entre MB e ZTA (GMAW)



Fonte: Autor (2019)

Figura 35 - Região B: zona de transição entre MB e ZTA (GTAW)



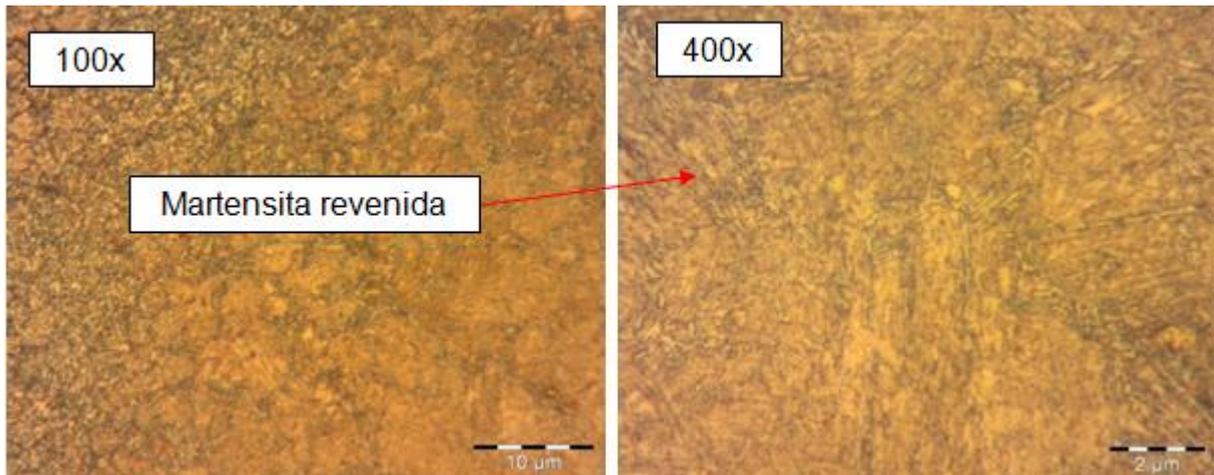
Fonte: Autor (2019)

#### 4.3.2.3 Região C, D e E: ZTA e transição ZF

Há presença de martensita revenida na amostra GMAW, assim torna o material duro, porém por ser revenida, tem-se alívio de tensões na região. Para

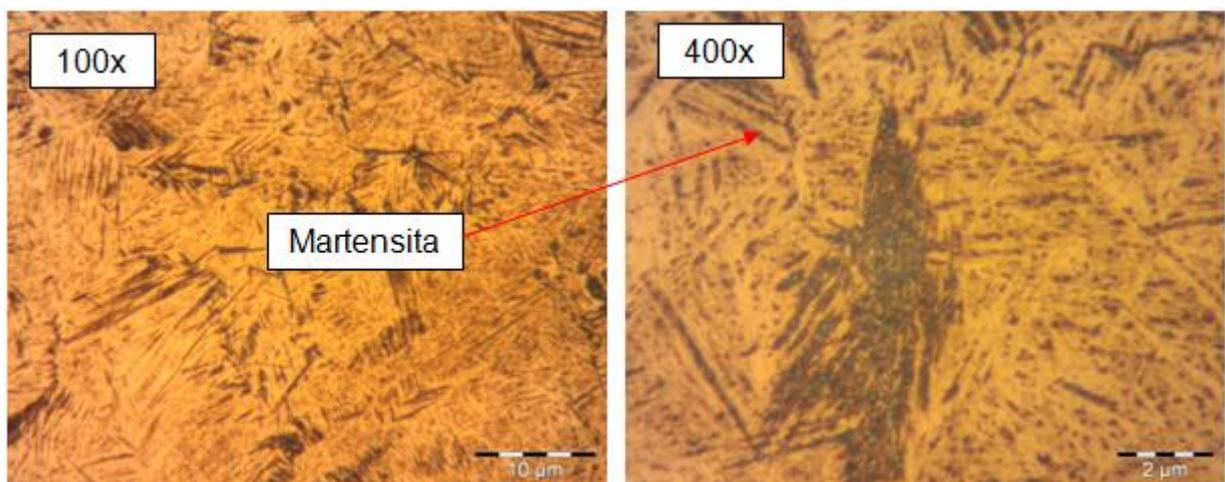
amostra GTAW, aparece a martensita clássica em forma de agulhas no meio dos grãos de ferrita, conseqüentemente torna o material com maior dureza e propício a trincas. Isso pode ter ocorrido, devido a uma maior velocidade de resfriamento no momento da soldagem (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005). A Figura 36 ilustra a região na amostra GMAW e a Figura 37 a região na amostra GTAW.

Figura 36 - Região C, D e E: ZTA e transição ZF (GMAW)



Fonte: Autor (2019)

Figura 37 - Região C, D e E: ZTA e transição ZF (GTAW)



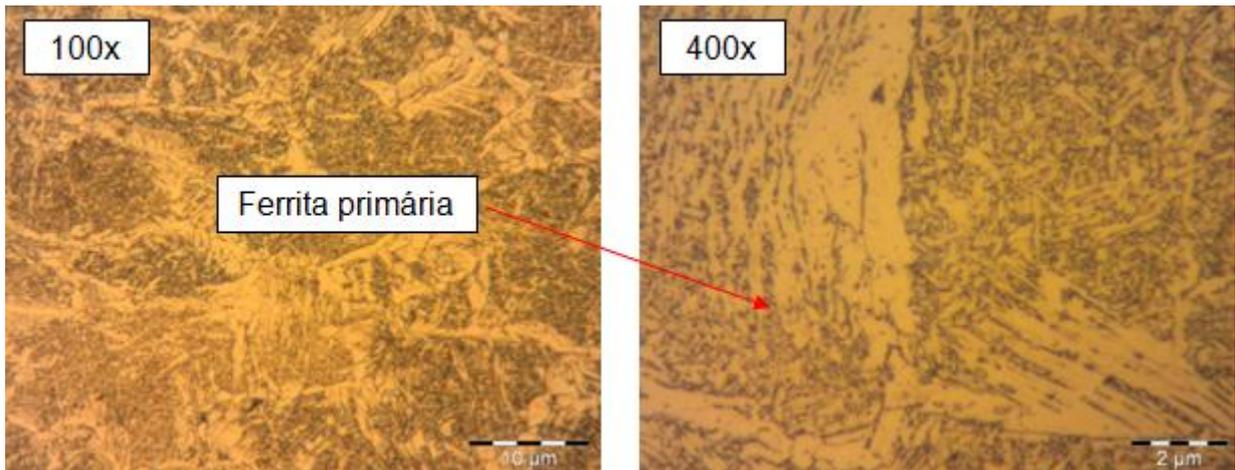
Fonte: Autor (2019)

#### 4.3.2.4 Região E: ZF

A presença de ferrita primária apresentou-se na amostra GMAW. A ferrita e constituintes não foi possível identificar na amostra GTAW, pois somente com um microscópio com uma resolução maior, para tentar identificar os constituintes

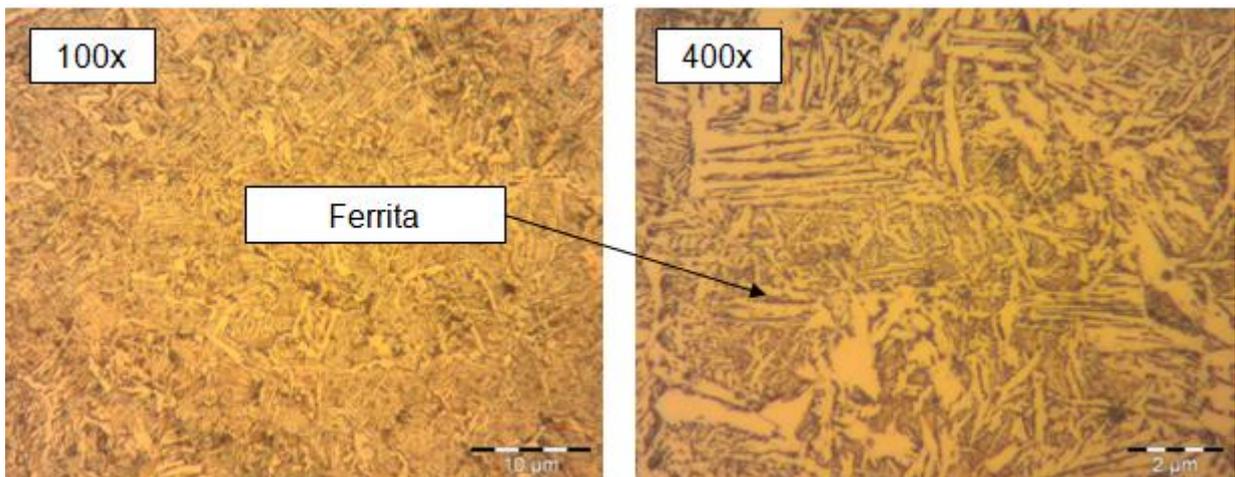
formados nessa região. Isso ocorre, em função de fatores como o tamanho de grão austenítico, composição química, velocidade de resfriamento, tamanhos e quantidade de inclusões. O material fica mais dúctil. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005). A Figura 38 mostra a região ZF na amostra GMAW e a Figura 39 na amostra GTAW.

Figura 38 - Região E: ZF (GMAW)



Fonte: Autor (2019)

Figura 39 - Região E: ZF (GTAW)



Fonte: Autor (2019)

#### 4.4 MICRODUREZA VICKERS

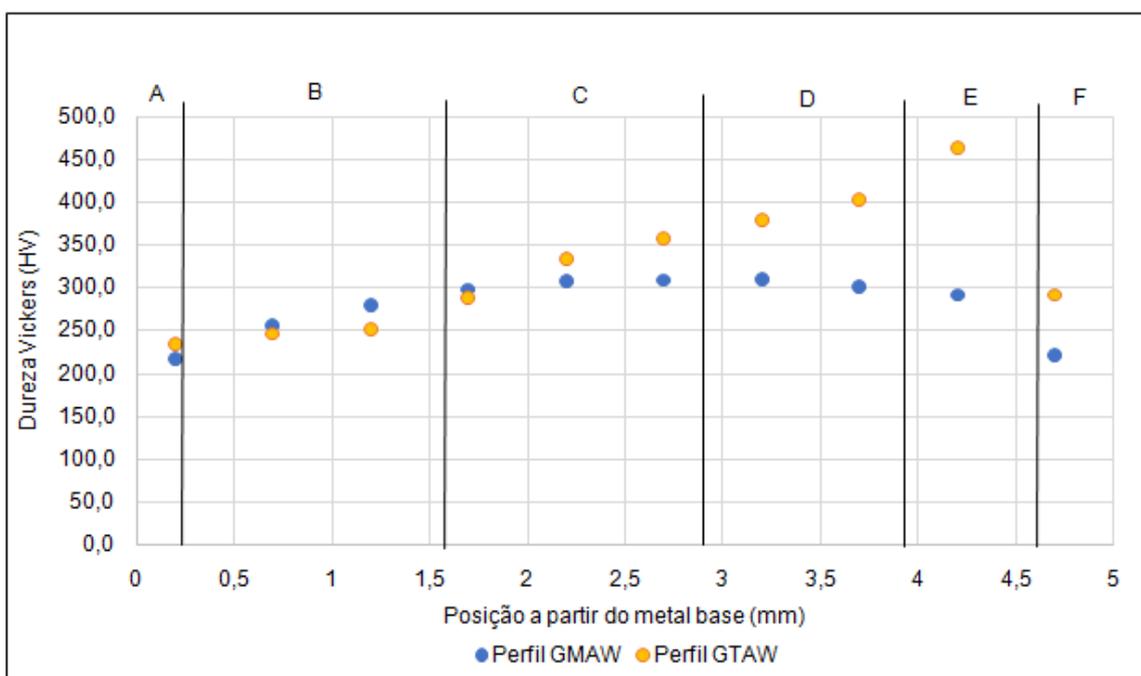
A Figura 40, apresenta o perfil de dureza das amostras soldadas pelo processo GMAW e GTAW. O que se pode perceber é que na Região A (metal base), ambos os processos tem praticamente a mesma dureza. Na região B (zona de transição entre o metal base e a ZTA), ambos os processos começam a aumentar a

sua dureza, sendo que na amostra GMAW aumenta 81,8 HV e na GTAW 54,8 HV.

Entretanto, entre as regiões C, D e E (ZTA, transição de ZTA e zona fundida), pode ser verificado que o perfil de dureza do processo GTAW, aumentou drasticamente, isto é, na região da ZTA, o perfil teve uma dureza de 333,1 HV e na região de transição da ZTA e zona fundida teve uma dureza de 462,9 HV. A dureza aumentou 129,8 HV. Mais do que isso, nessas mesmas regiões o processo GMAW, se manteve com valores de dureza constantes entre 290 HV e 310 HV, tendo uma pequena redução de dureza no final da região ZTA e começo da ZF, os valores de dureza na região da ZTA era 307,9 HV e no começo da zona fundida era 291,9 HV. A dureza diminuiu 16 HV. Conforme resultados obtidos na micrografia, nessa região, se formou martensita na microestrutura, justificando a elevada dureza, nas amostras GTAW. Nas amostras GMAW, também se obteve martensita, porém, revenida, por isso o valor de dureza não alterou muito, se mantendo constante.

Na região F (zona fundida), os dois processos tiveram uma queda de dureza, principalmente o perfil GTAW, pois o mesmo estava com 462,9 HV na região de transição e baixou o valor da dureza para 291,7 HV, havendo uma redução de dureza de 171,2 HV. Todavia, nessa região, comprovaram pelas análises micrográficas que possuem ferrita primária e ferrita, justificando a diminuição da dureza.

Figura 40 – Perfil de microdureza das amostras GMAW e GTAW



Fonte: Autor (2019)

## 5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados apresentados e discutidos, pode-se concluir que a soldagem GTAW no aço SAE 4130, com metal de adição, obteve resultado pouco satisfatório.

No processo de soldagem GTAW, o tempo de soldagem foi de 210 segundos contra 90 segundos das amostras pelo processo GMAW. Como a solda foi feita manualmente, esse tempo deve ser considerável se tratando de produtividade.

Nos ensaios de tração e fadiga, as juntas soldadas pelo processo GMAW, romperam no metal de base, comprovando a boa resistência da solda, onde os valores de tensão de ruptura e escoamento foram maiores. Porém, as juntas soldadas pelo processo GTAW, romperam na ZF, constatando a fragilidade da solda.

O ensaio macrográfico, comparou as amostras do processo GTAW, com as amostras do processo GMAW, pode-se observar que as amostras, que tinha a ZTA com um maior comprimento, pertenciam ao processo GTAW, conseqüentemente a energia de soldagem obteve um valor elevado. Na micrografia, podemos observar que no metal base, a estrutura é de perlita e ferrita, isso indica que é uma região dúctil e tenaz.

No ensaio de microdureza, o resultado do perfil de dureza, nos mostrou que as juntas GTAW, analisadas na região ZTA, tinha martensita na sua microestrutura, deixando o material mais duro e conseqüentemente frágil. Pode ter contribuído para essa situação o material ter alto teor de carbono equivalente e também não ter sido realizado um pré-aquecimento antes de soldar. Já as juntas GMAW, mostraram na região ZTA, um comportamento mais dúctil e mais resistente.

A soldagem GMAW, mostrou resultados melhores em comparação com a soldagem GTAW, para essa situação. Os resultados poderiam ser melhores se a qualidade da junta ao soldar fosse melhor, pois nas amostras ensaiadas, as peças apresentaram falhas de mordedura e também falta de fusão, falhas típicas de uma solda feita manualmente.

### **SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Realizar o processo de soldagem da junta de modo automatizado. Isso para melhorar a qualidade da solda na junta.
- Modificar o ângulo ao soldar as juntas, por exemplo, 30 graus.
- Realizar ensaio de fadiga, aplicando carga dinamicamente na região soldada.

## REFERÊNCIAS

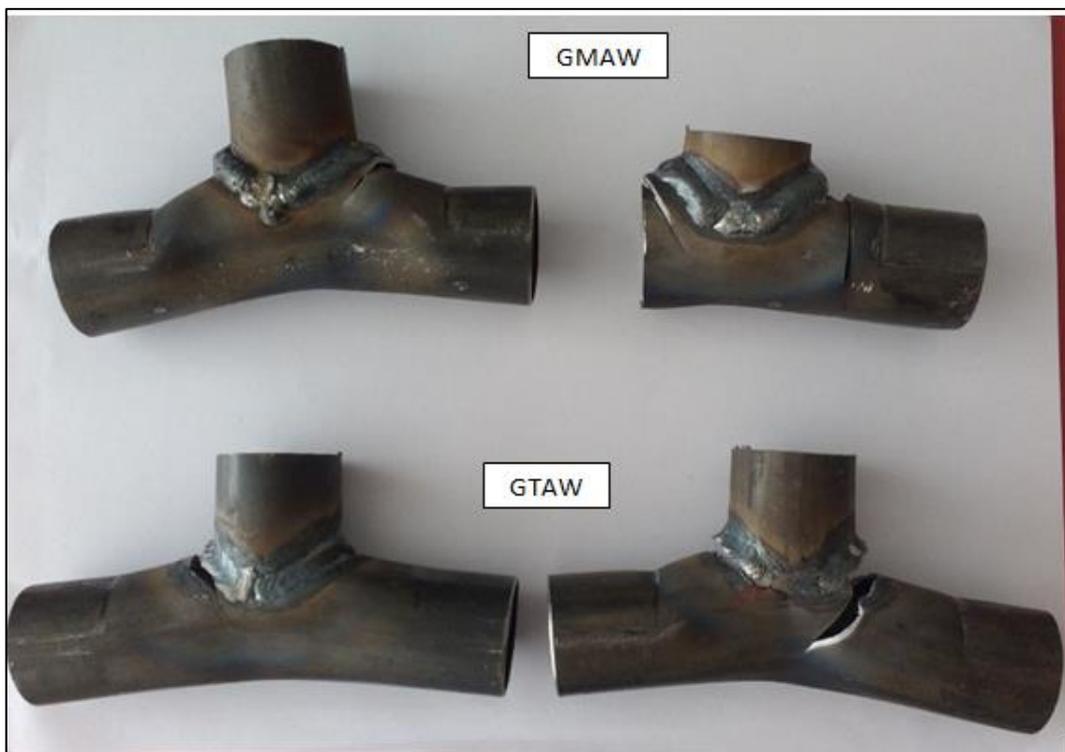
- CALLISTER, Jr.; W.D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- CARRUPT, M. C.; BORGES, F.; LACORTE, J. O.; ASSUNÇÃO, F. S. (2017). **Caracterização microestrutural e mecânica de junta soldada em aço médio carbono e baixa liga**. Disponível em: <https://revista.univap.br/index.php/revistaunivap/article/view/1157>>. Acesso em: 15 jul. 2019.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7. ed., ampl. e rev. São Paulo: 1996.
- GALL, T. L.; BOYER, H. E. **Metals handbook: desk edition**. Ohio: American Society for Metals, 1985.
- MACHADO, I. G. **Soldagem e Técnicas Conexas: Processos**. 1. ed. Porto Alegre, 1996.
- MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 362 p. (Didática).
- NASCIMENTO, M.P.; VOORWALD, H.J. e FILHO, J.D. (2012). **Efeitos de vários reparos de solda TIG na resistência à fadiga axial de juntas soldadas em aço aeronáutico AISI 4130. Fadiga e Fratura de Materiais e Estruturas de Engenharia**. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1460-2695.2011.01606.x>>. Acesso em: 15 jul. 2019.
- PORTAL. **SAE Brasil**. Disponível em: <http://portal.saebrasil.org.br/>>. Acesso em: 10 jun. 2019.
- SILVA, A. L. V. d. C. e; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 3.ed. rev. e ampl. São Paulo: E. Blücher, 2010.
- SOUZA, S. A. de. **Composição química dos aços**. São Paulo: E. Blücher, 1989.
- USLAB, **World Auto Steel**. Disponível em: <https://www.worldautosteel.org/projects/ulsab/>>. Acesso em: 10 jun. 2019.
- WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. de. **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: E. Blücher, 1992.

## APÊNDICES

Apêndice A – Foto CP pós ensaio: Tração metal base



Apêndice B – Foto CP pós ensaio: Tração conjunto soldado



Apêndice C – Foto CP pós ensaio: Fadiga GMAW



Apêndice C – Foto CP pós ensaio: Fadiga GTAW







## Anexo C – Certificado de inspeção aço SAE 4130

	Vallourec Soluções Tubulares do Brasil S.A. Usina Barreiro - Av. Olimo Meireles, 65 Barreiro de Boiivo - CEP: 30640-010			<b>Certificado de Inspeção</b> (De acordo com DIN EN 10204.3.1) N°.: 0030026394 / 00	Folha: 1 / 2
Cliente: Fundação Univ De Casias Do Sul		País: Brasil		Cod.Material: 410514 Pedido Usina: 510528 / 40 Pedido Cliente: BIAJA - Tobaja UCS	
PRODUTO: TUBO DE AÇO SEM COSTURA TREFILADO A FRIO , PONTA LISA , BKS DIMENSÕES: 19,05 mm X 16,55 mm X 1,25 mm GRAU DO AÇO: SAE 4130 NORMAS: DIMENSIONAL: DIN EN 10305-1, 05.2010 QUÍMICA: SAE J404.01.2009 PROTEÇÃO SUPERFICIAL: EXTERNA: OLEADO TOLERÂNCIAS: DIÂMETRO EXTERNO(CORPO TUBO): -0,08 mm / +0,08 mm DIÂMETRO INTERNO: -0,08 mm / +0,08 mm PAREDE: -0,13 mm / +0,13 mm COMPRIMENTO: FAIXA 5000,00 mm - 7000,00 mm					
Corrida	Lote Coletor	Amarrado	Peças	Comprimento(m)	Peso (Kgf)
141656	474093	8000489500	4	29,14	16
Total			4	29,14	16
O PRODUTO FOI APROVADO NOS SEGUINTES TESTES/INSPEÇÕES: DIMENSIONAL # VISUAL # TESTE DE CORRENTES PARASITAS : COM TESTE DE EDDY-CURRENT #					

## Anexo D – Certificado de inspeção aço SAE 4130

vallourec		Tubo Verde		RINA		Certificado de Inspeção (De acordo com DIN EN 10204.3.1)								
						Nº.: 0030026394 / 00								
						Folha 2 / 1								
<b>Composição Química (%)</b>		Processo: Forno básico a oxigênio, aço acuminado												
		C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Al	Cu	V	Nb	Ti
Análise de Corrida	Min	0,280	0,400			0,150		0,800	0,150					
	Max	0,330	0,600	0,030	0,040	0,350	0,350	1,100	0,250		0,350			
Corrida Lote Controle														
141656 030002916123		0,30	0,51	0,007	0,001	0,19	0,02	0,94	0,21	0,029	0,010	0,002	0,002	0,001
<b>Ensaio de Tração</b>														
Direção do Corpo Prova: Longitudinal			Temperatura: Ambiente				Espessura da parede: 1,23 mm			Medida L0: L0=A1				
			Corpo de Prova				Área	LE	AL					
							(mm <sup>2</sup> )	(MPa)	(%)					
			Espessura: Mm					332	17					
			Max											
Corrida Lote Controle		Nº Tubo	SEÇÃO TOTAL				69,9	793	22					
141656 030002916123		47409					69,9	774	23					
		47409												
LE Limite de Escoamento; AL Alongamento;														
Observações:														
<p>Certificamos que este material foi produzido e inspecionado de acordo com todas as exigências destas normas e especificações, e todos os resultados considerados satisfatórios. Este Certificado é processado por sistema informatizado e é válido com assinatura.</p>														
				DEPARTAMENTO DE CONTROLE DE QUALIDADE								DATA		
				TAX: (31) 3328-2987								03.01.2018		
				e-mail:astimidia.astimidia-br@vallourec.com								 RONALDO DE FARIA ANTUNES - CREA-MG 02343 RESPONSÁVEL TÉCNICO		
TUBOS VERDES: Os tubos da Vallourec do Brasil S.A. são fabricados com aço, cujo processo de produção utiliza o carvão vegetal como fonte de energia. Este carvão é oriundo de mais de 100.000 ha de florestas plantadas pela Vallourec Florestal Ltda.. Com a aquisição de 0,0 tonelada(s) de tubo de aço da Vallourec do Brasil S.A., sua empresa contribuiu para a redução do efeito estufa, ao evitar o acúmulo de 0,0 tonelada(s) de CO2 na atmosfera.														