

**Bruno Renato Brino Melloto**

**COMPARAÇÃO ENTRE O PROCESSO DE  
SOLDAGEM TIG COM DUPLA FUSÃO E ARAME  
TUBULAR COM GOIVAGEM PARA JUNTAS DE  
AÇOS INOXIDÁVEIS ASTM A240 TP 316L**

Monografia apresentada ao Programa de  
Educação Continuada em Engenharia da Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo para  
conclusão do curso de Especialização.

São Paulo  
Fevereiro/2014

**Bruno Renato Brino Melloto**

(Engenheiro Mecânico Pleno, EEP-SP, 2010)

**COMPARAÇÃO ENTRE O PROCESSO DE  
SOLDAGEM TIG COM DUPLA FUSÃO E ARAME  
TUBULAR COM GOIVAGEM PARA JUNTAS DE  
AÇOS INOXIDÁVEIS ASTM A240 TP 316L**

Monografia apresentada ao Programa de  
Educação Continuada em Engenharia da Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo para  
conclusão de curso de Especialização.

Área de Concentração: Engenharia da Soldagem

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Duarte Brandi

Co-Orientador: ME. Jaime Casanova Soeiro Jr.

São Paulo

Fevereiro/2014

"Os sonhos são como bússola, indicando os caminhos que seguiremos e as metas que queremos alcançar. São eles que nos impulsionam, nos fortalecem e nos permitem crescer."

Augusto Cury.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a minha esposa e companheira de todas as horas, Talita Melloto, pela paciência e apoio incondicional nesses dois anos dedicados a este curso de especialização, tempo este no qual estive ausente grande parte do tempo.

Aos meus pais Vlademir e Izabel, pois sem eles nada disso seria possível, aos meus irmãos Daniel e Gabriel, aos meus amados e queridos sobrinhos e filhos, Kaique Freitas Melloto, Júlia Freitas Melloto e Emanuelly Ramos Marcelino.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a DEUS, por ter me capacitado desde a minha entrada na pós graduação até a conclusão do presente trabalho.

Aos meus pais Vlademir e Izabel, pelo apoio e incentivo, pois sem eles com certeza não seria possível vencer mais essa etapa da minha vida.

A minha esposa Talita, pela paciência, apoio e carinho.

Ao Pastor José Aléssio de Campos, pelas orações, apoio e incentivo.

Ao querido professor e orientador Prof. Doutor Sergio Duarte Brandi pela valorosa orientação, pelo incentivo e entusiasmo cativante, que foram imprescindíveis para conclusão deste trabalho.

Ao ME. Jaime Casanova Soeiro Júnior, pela co-orientação deste trabalho.

Ao meu supervisor Sr. Valdir San Jorge pelo apoio e incentivo para realização desta especialização.

Ao Sr. Marcelo Aparecido Zambianco, por realizar o processo de soldagem das chapas de teste.

Aos amigos Alexandre Togni, Francisco Carlos Araújo, Gustavo Ometo Lambertuci e Marcelo Avellar, que contribuíram muito para a realização deste trabalho.

Enfim meus agradecimentos a todos que de alguma forma me ajudaram a conquistar meus objetivos.

À NG Metalúrgica, pela disponibilidade do laboratório de soldagem e realização da usinagem dos corpos de prova.

"Deus nos fez perfeitos, e não escolhe os capacitados, capacita os escolhidos. Fazer ou não fazer algo só depende de nossa vontade e perseverança".

(Albert Einstein)

## **CURRICULUM VITAE**

### **FORMAÇÃO ACADÊMICA**

- ✓ Especialização em Eng. de Soldagem  
PECE POLI – USP.

#### **Cursando**

- ✓ Superior em Engenharia Mecânica  
Escola de Engenharia de Piracicaba – EEP
- Concluído em Dez/2010**

### **IDIOMAS**

- ✓ Inglês (Intermediário – Cursando, Cultura Inglesa).
- ✓ Espanhol – leitura (básico)

### **EXPERIÊNCIA PROFISSIONAL**

#### **NG METALURGICA**

*01 de Fevereiro de 2011 até o presente momento*

**Cargo: ENGENHEIRO DE PROCESSOS SENIOR**

- Atribuições do Cargo:
- ✓ Elaboração de: EPS, RQPS, CQS, IEIS, Planos de Soldagem e Mapas de Juntas.
- ✓ Controle: Lista de Operadores Qualificados, EPS's, Desempenho de Soldadores, etc...
- ✓ Normas: ASME IX, API, AWS D1.1, N-133, N-1852, N-2301, N-1707 e outras.
- ✓ Soldagem Materiais: Austeníticos, Ferríticos, Duplex; Super Duplex, Aços Carbono e Baixa Liga.
- ✓ Processos de Soldagem MIG-MAG; Eletrodo Revestido; TIG; Arame Tubular; Arco Submerso e Plasma.

- ✓ Elaborar e Aprovar processos de fabricação;
- ✓ Programar máquinas de comando numérico;
- ✓ Realizar análise e elaboração e aprovação de instruções operacionais, mantendo a organização e o fluxo de produção;
- ✓ Elaboração e aprovar dispositivos para otimização de processos;
- ✓ Análise e desenvolvimento de ferramentas para usinagem;
- ✓ Elaborar e aprovar a otimização de Lay-out de fabrica;

## **CURSOS DE APERFEIÇOAMENTO**

- ✓ Técnico em Química – Anglo Cidade Alta;
- ✓ Operador de Torno Mecânico I – Senai;
- ✓ Operador de Torno Mecânico II – Senai;
- ✓ Operador de Torno CNC (Comando Mach 8) – Senai;
- ✓ Programador de Torno CNC (Comando Mach 8) – Senai;
- ✓ Caldeiraria – Senai (**Ganhador do “Premio Mario Henrique Simonsen” como melhor caldeireiro das turmas formadas em 2005**);
- ✓ ANSYS (Analise de Elementos Finitos) – EEP;
- ✓ Geradores de vapor (caldeiras)- EEP;
- ✓ Turbinas a vapor- EEP;
- ✓ Auto Cad 2000 – Trodon;
- ✓ Solid Edge V-17 – EEP;
- ✓ Graduado como Estudante SAE BRASIL nº BR00022493 (Society of Automotive Engineers);
- ✓ Operação e manuseio de máquina de indução térmica para fixação de ferramentas para usinagem – Seco Tools;
- ✓ Metalização, operação e manutenção – MSS;
- ✓ Capacitação em EdgeCam Fresamento – SKA;
- ✓ Capacitação em EdgeCam Torneamento – SKA;
- ✓ Capacitação EdgeCam Professional Milling (B Axis) – SKA;
- ✓ Capacitação EdgeCam 5 axis Simultaneous - SKA;
- ✓ Inventor 2009 – EEP;
- ✓ Inspetor de soldagem N1 – FBTS

## **RESUMO**

Durante a soldagem na indústria alimentícia e petroquímica é comum à dúvida sobre qual é o processo de soldagem é o mais adequado com o objetivo de minimizar os custos, maximizar os lucros, contudo sem perder de vista a qualidade dos produtos, uma vez que este é um dos fatores de maior relevância. Como cada processo de soldagem apresenta vantagens específicas, para se determinar com exatidão qual dos processos de soldagem, TIG com dupla fusão ou Arame Tubular com goivagem na raiz, apresenta melhor custo benefício, foram realizadas soldagem nos corpos de aço inoxidável AISI 316L com 9,5 mm de espessura, para juntas de topo com chanfro em "V", utilizando para isto os dois processos. Para o processo TIG com dupla fusão foi empregado como metal de adição a vareta para aço inoxidável ER 316 L, com diâmetro de 2,5 mm, enquanto para o processo de soldagem pelo processo ARAME TUBULAR foi empregado como metal de adição o arame tubular para aço inoxidável E 316L T1-4/1, com diâmetro de 1,2 mm. Também foi realizado um corpo de prova para goivagem com o mesmo material do metal base (AISI 316 L) que foi goivado através do processo de goivagem a ar com eletrodo de carvão e limpeza posterior por esmerilhamento.

Os corpos de prova soldados pelo processo TIG dupla fusão foram aprovados em todos os ensaios, tais como, macrografia, tração, dobramento e corrosão prática A e pratica E da norma ASTM A 262, além de ter apresentado o dobro da resistência no ensaio de impacto na região da solda quando comparado com o corpo de prova soldado pelo processo Arame tubular.

Já os corpos de prova soldados pelo processo Arame Tubular com goivagem posterior na raiz foram aprovados nos ensaios de macrografia, tração, dobramento e corrosão na Pratica A da norma ASTM A 262, e reprovado no ensaio de corrosão pratica E da norma ASTM A 262, por terem apresentado trincas Intergranulares, ainda como fator desfavorável em relação ao processo TIG o processo de soldagem por Arame Tubular apresentou um aumento no tamanho de grão de cerca de 14% quando comparado com o processo TIG, o que favorece a redução da tenacidade do metal de solda, conforme demonstrado nos ensaios de Charpy.

Pelos motivos apresentados anteriormente e outras vantagens já conhecidas como qualidade da solda e excelente acabamento conclui-se que o processo TIG com a técnica dupla fusão apresenta um melhor desempenho e uma melhor qualidade na soldagem de aços inoxidáveis austeníticos.

## **ABSTRACT**

Still due the globalization, the international competition has been a reality in the corporate life, for this reason it is extremely necessary to produce more, with a lower cost and within the geometric specifications, then it is necessary to carefully controlling the process and product characteristics, in example, distortion control for that the Brazilian products can be internationally competitive.

At the food and petrochemical industry the question as which is the welding best process is very common, this in order to minimize costs, maximize profits however without losing the quality of products.

As each welding process has specific advantages to determine exactly which of welding processes , TIG with dual fusing or Tubular wire with gouging the root , show the best cost benefit , it were performed welding on the steel stainless bodies AISI 316L with thickness 9.5 mm , for "V" top chamfer gaskets, using both of these two processes. For TIG with dual fusing was used with filler metal the ER 316L rod for 2,5mm steel stainless, while for the Tubular wire welding process was used as a filler metal the 316L T1-4/1 tubular wire for steel stainless with a 1,2mm diameter of 1.2 mm .

Also it was performed a specimen gouging with the same material as the base metal (AISI 316 L ) that has been gouged through the air gouging process with coal electrode and after cleaning by grinding.

The specimen welded by TIG process were approved in all the tests passed all the tests, such as Macrograph , traction, bend and corrosion practice

"A" and "E" using ASTM A 262 , besides it's showed twice resistance in the impact test in the weld region compared with the specimen welded by tubular wire process .

However the specimen welded by tubular wire with gouging after in the root were approved in macrograph tests , traction , bending and corrosion in Practice "A" of ASTM A 262 , but it was rejected on the corrosion test practice "E" ASTM A 262 , for submitting intergranular cracks , even as unfavorable factors regarding the TIG welding process with tubular wire showed an increase in grain size in about 14 % compared with TIG process, which helps to reduce the tenacity resistance of the welding metal according to showed in Charpy tests .

For the reasons shown previously and other advantages already known as weld quality and finishing excellent it is possible concluded that the TIG process with dual fusion shows better performance and better quality in welding austenitic stainless steels .

## **LISTA DE FIGURAS**

<b>Figura 2.1</b> – Junta de topo soldada [Cortesia NG].....	15
<b>Figura 2.2</b> - Evolução dos processos de soldagem ao longo do tempo [4] ...	16
<b>Figura 2. 4</b> - Arco Elétrico do Processo TIG [5].....	18
<b>Figura 2. 5</b> - Esquema de equipamentos do processo TIG [Cortesia FBTS]... 19	
<b>Figura 2. 6</b> - Tocha para soldagem TIG manual [Cortesia Miller].....	20
<b>Figura 2. 7</b> - Fluxo do gás de proteção bocal cerâmico TIG [Cortesia Miller].	21
<b>Figura 2. 8</b> – Exemplo de equipamento para controle automático da tensão do arco elétrico [cortesia Jetline] .....	26
<b>Figura 2. 9</b> – Exemplo de equipamento para controle mecânico da deflexão da tocha [cortesia Bug-O Systems]. .....	27
<b>Figura 2. 10</b> – Exemplo de equipamento para controle magnético da deflexão do arco elétrico. (a) detalhe do deflector na tocha; (b) sistema de controle da deflexão e (c) tipos de deflexão do arco elétrico [cortesia Jetline Inc.].....	28
<b>Figura 2. 11</b> - Comportamento do Argônio e Hélio sobre a tensão/corrente [3]	
.....	30
<b>Figura 2.12</b> - Soldagem com o processo TIG dupla fusão.....	37
<b>Figura 2.13</b> - Esquema do processo TIG dupla fusão autógena. ....	38
<b>Figura 2.14</b> - Esquema do processo TIG dupla fusão com adição de material por um lado. Em (a) vista lateral e em (b) vista superior. ....	39
<b>Figura 2.15</b> - Esquema do processo TIG dupla fusão com adição de material pelos dois lados. Em (a) vista lateral e em (b) vista superior .....	39
<b>Figura 2.16</b> - Esquema processo FCAW sem proteção gasosa [Cortesia FBTS].	
.....	40
<b>Figura 2.17</b> - Esquema processo FCAW com proteção gasosa [Cortesia FBTS].	
.....	40
<b>Figura 2.18</b> - Esquema de equipamentos do processo FCAW [Cortesia FBTS].	
.....	44
<b>Figura 2.19</b> - Chanfro para processo Arame Tubular x Arame sólido [7].....	50
<b>Figura 2.20</b> - Juntas de ângulo na posição vertical Ascendente [7].....	50
<b>Figura 2.21</b> - Juntas de ângulo na posição vertical descendente [7]. .....	51
<b>Figura 2.22</b> - Juntas de topo na posição vertical ascendente [7]. .....	51
<b>Figura 2.23</b> - Ângulo de tocha [7]. .....	52
<b>Figura 2.24</b> - Goivagem a Chama [8].....	54
<b>Figura 2.25</b> - Goivagem a arco elétrico [8].....	54
<b>Figura 2.26</b> - Goivagem a arco elétrico .....	55
<b>Figura 4.1</b> - Representação da junta para o processo TIG.....	59
<b>Figura 4.2</b> - Representação do preenchimento da junta, com sequência de passes.....	60
<b>Figura 4.3</b> - Soldagem dos corpos de prova (TIG). .....	60
<b>Figura 4.4</b> - Foto do corpo de prova (TIG) soldado.	61
<b>Figura 4.5</b> - Representação da junta.....	62
<b>Figura 4.6</b> - Representação do preenchimento da junta, com sequência de passes.....	62

<b>Figura 4.7</b> - Foto do corpo de prova soldado (Arame Tubular).....	63
<b>Figura 4.8</b> - Foto do corpo de prova (tubular goivado).....	63
<b>Figura 4.9</b> - Foto da aplicação do penetrante .....	63
<b>Figura 4.10</b> - Foto da aplicação da revelação do penetrante.....	63
<b>Figura 4.11</b> - Foto do corpo de prova soldado (Arame Tubular).....	64
<b>Figura 4.12</b> - Foto da traçagem do corpo de prova.....	64
<b>Figura 4.13</b> - Foto da pesagem do corpo de prova antes da goivagem. ....	65
<b>Figura 4.14</b> - Foto da pesagem do corpo de prova após a goivagem. ....	65
<b>Figura 4.15</b> - Máquina utilizada para realizar o ensaio de tração.....	66
<b>Figura 4.16</b> - Dimensões dos CP's para ensaio de tração .....	66
<b>Figura 4.17</b> - Retirada dos corpos de prova para tração.....	67
<b>Figura 4.18</b> - Máquina utilizada para realizar o ensaio de Dobramento. ....	67
<b>Figura 4.19</b> - Retirada dos corpos de prova para dobramento.....	68
<b>Figura 4.20</b> - Máquina utilizada para realizar o ensaio de Charpy.....	69
<b>Figura 4.21</b> - Detalhe dos sets de Impacto.....	69
<b>Figura 4.22</b> - Ferritoscópio. ....	70
<b>Figura 4.23</b> - Microscópio estereoscópico.....	71
<b>Figura 4.24</b> - Microscópio óptico.....	72
<b>Figura 4.25</b> - Corpo de prova pratica E. ....	74
<b>Figura 5.1</b> – Limite de resistência do metal base e das juntas soldadas.....	75
<b>Figura 5.2</b> – Energia absorvida no ensaio de impacto a -60oC Limite de resistência do metal base e das juntas soldadas.....	75
<b>Figura 5.5</b> - Macrografia do processo TIG. ....	78
<b>Figura 5.6</b> - Macrografia do processo Arame tubular.....	81
<b>Figura 5.7</b> - Micrografia do Metal Base A240 Tp. 316L. Aumento 200 X. ....	81
<b>Figura 5.8</b> - Micrografia realizada no metal de base do C.P soldado pelo processo Arame Tubular. Aumento de 200 X.....	83
<b>Figura 5.9</b> - Micrografia realizada no metal de base do C.P soldado pelo processo TIG. Aumento 200 X.....	83
<b>Figura 5.10</b> - Micrografia realizada na Solda obtida pelo processo Arame Tubular. Aumento de 200 X. ....	84
<b>Figura 5.11</b> - Micrografia realizada na Solda obtida pelo processo TIG. Aumento de 200 X.....	85
<b>Figura 5.12</b> - Micrografia realizada na ZAC 1 da soldagem obtida pelo processo Arame Tubular. Aumento de 200 X.....	86
<b>Figura 5.14</b> - Micrografia realizada na ZAC 1 da soldagem obtida pelo processo TIG. Aumento de 200 X. ....	87
<b>Figura 5.15</b> - Micrografia realizada na ZAC 2 da soldagem obtida pelo processo TIG. Aumento de 200 X. ....	88
<b>Figura 5.16</b> - Micrografia realizada do lado esquerdo do corpo de prova de goivagem a ar com eletrodo de Grafite. Aumento de 200 X.....	89
<b>Figura 5.17</b> - Micrografia realizada do lado direito do corpo de prova de goivagem a ar com eletrodo de Grafite. Aumento 200 X.....	90
<b>Figura 5.18</b> - Micrografia realizada na região do fundo do sulco goivado do corpo de prova de goivagem a ar com eletrodo de Grafite. Aumento 200 X....	91
<b>Figura 5.19</b> - Micrografia realizada para ensaio de corrosão no Corpo de prova soldado pelo processo Arame Tubular. Aumento 200 X.....	92

<b>Figura 5.20</b> - Micrografia realizada para ensaio de corrosão no Corpo de prova soldado pelo processo TIG. Aumento 200 X.....	93
<b>Figura 5.21</b> - Micrografia realizada para ensaio de corrosão no Corpo de prova de goivagem a ar com eletrodo de grafite e limpeza posterior. Aumento 200 X.....	94
<b>Figura 5.22</b> – Aspecto visual do ensaio de corrosão Pratica E do corpo de prova soldado pelo processo Arame Tubular. Aumento 20 X.....	95
<b>Figura 5.23</b> – Aspecto visual do ensaio de corrosão Pratica E do corpo de prova soldado pelo processo TIG. Aumento 20 X.....	96
<b>Figura 5.24</b> - Aspecto visual do ensaio de corrosão pratica E do corpo de prova de goivagem ar com eletrodo de Grafite com limpeza posterior. Aumento 20 x.....	97

**LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 2. 1</b> – Características do processo Soldagem TIG [23].....	17
<b>Tabela 2. 2</b> - Características dos gases proteção para o processo TIG [2] ....	30
<b>Tabela 2. 3</b> - Vantagens, limitações e aplicações para o processo TIG [2] ....	32
<b>Tabela 2. 4</b> - Características processo Soldagem Arame Tubular [24].....	43
<b>Tabela 2.5</b> - Vantagens, limitações e aplicações para o processo Arame Tubular [23] .....	49
<b>Tabela 4.1</b> - Composição química dos materiais utilizados. ....	57
<b>Tabela 4.2</b> – Propriedades mecânicas dos materiais utilizados. ....	57
<b>Tabela 4.3</b> - Composição química da vareta utilizada. ....	58
<b>Tabela 4.4</b> - Propriedades mecânicas da vareta utilizada. ....	58
<b>Tabela 4.5</b> - Composição química do arame tubular utilizado.....	58
<b>Tabela 4.6</b> - Propriedades mecânicas do arame tubular utilizado. ....	59
<b>Tabela 4.7</b> - Parâmetros de soldagem.....	61
<b>Tabela 4.8</b> - Dimensões dos corpos de prova. ....	74
<b>Tabela 5.1</b> - Resultados dos ensaios de Tração.....	75
<b>Tabela 5.2</b> - Resultados dos ensaios de Dobramento. ....	76
<b>Tabela 5.3</b> - Resultados dos ensaios de Charpy. ....	77
<b>Tabela 5.4</b> - Resultados das análises de fração Volumétrica de Ferrita. ....	79

## **LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS**

ASM	American Society of Materials
ASTM	American Society For Testing And Materials
AWS	American Welding Society
CP	Corpo de prova
Fe	Ferro
FCAW	Flux Cored Arc Welding
GMAW	Gas Metal Arc Welding
TIG	Gas Tungsten Arc Welding
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
MS	Metal de Solda
Ni(eq)	Níquel Equivalente
TIG	Tungsten Inert Gas
AT	Arame Tubular
ZAC 1	Zona Afetada pelo Calor do lado direito do corpo de prova
ZAC 2	Zona Afetada pelo Calor do lado esquerdo do corpo de prova

## SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	ii
AGRADECIMENTOS .....	iii
CURRICULUM VITAE.....	v
RESUMO .....	1
ABSTRACT .....	3
LISTA DE FIGURAS.....	5
LISTA DE TABELAS.....	8
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS .....	9
SUMÁRIO.....	10
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1 Métodos de União dos Metais.....	14
2.2 Definição de Soldagem.....	15
2.3 Pequeno Histórico da Soldagem.....	15
2.4 Processos de Soldagem.....	16
2.5 Processo TIG.....	16
2.5.1 Equipamentos.....	19
2.5.1.1 Tocha. ....	20
2.5.1.2 Pinças ou Mandril. ....	21
2.5.1.3 Bocais. ....	21
2.5.1.4 Eletrodos.....	22
2.5.1.5 Eletrodos de Tungstênio Puro. ....	23
2.5.1.6 Eletrodos Ligados. ....	23
2.5.1.7 Fontes de Energia.....	24
2.5.1.8 Ignitor de alta frequência. ....	25
2.5.2 Consumíveis .....	29
2.5.2.1 Gás de proteção .....	29
2.5.2.2 Tipos de gases. ....	29
2.5.2.3 Metais de Adição .....	31
2.5.3 - Vantagens, limitações e aplicações. ....	32
2.5.4 Materiais Soldáveis pelo Processo. ....	32
2.5.4.1 Aços Inoxidáveis.....	33
2.5.5 Técnicas de Soldagem TIG. ....	35
2.5.5.1 Métodos de Iniciação do Arco. ....	35
2.5.5.2 Soldagem Manual. ....	35
2.5.5.3 Soldagem Mecanizada.....	36
2.5.5.4 Soldagem Semi-Automática .....	36
2.5.5.5 Soldagem Automática .....	36
2.5.5.6 Técnica TIG Dupla Fusão .....	37
2.6 Processo Soldagem Arame Tubular (FCAW).....	40
2.6.1 Equipamentos.....	44
2.6.2 Consumíveis .....	47
2.6.2.1 Gás de proteção.....	47
2.6.2.2 Tipos de gases.....	47
2.6.3 Metais de Adição.....	48

2.6.4 Vantagens, limitações e aplicações.....	49
2.6.5 Técnicas de Soldagem para o processo arame tubular.....	49
2.6.5.1 - Soldagem em juntas de ângulo na vertical descendente .....	50
2.6.5.2 - Soldagem em juntas de ângulo na vertical ascendente.....	50
2.6.5.3 - Juntas de topo na posição vertical ascendente .....	51
2.6.5.4 - Ângulo de tocha:.....	52
2.7 GOIVAGEM.....	53
2.7.1 TIPOS DE GOIVAGEM .....	53
2.7.1.1 Goivagem a Gás.....	53
2.7.1.2 Goivagem a Arco .....	54
2.7.1.3 Goivagem por Meio Mecânico: Usinagem .....	55
2.7.1.4 Goivagem por Meio Mecânico: Esmerilhamento .....	55
3. OBJETIVOS .....	56
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	56
4.1 Materiais.....	57
4.1.1 Metal de Base.....	57
4.1.2 Consumíveis de soldagem e goivagem .....	57
4.2 Parâmetros utilizados.....	58
4.3 Ensaios Realizados.....	59
4.3.1 Ensaio de Tração.....	66
4.3.2 Ensaio de Dobramento.....	66
4.3.3 Ensaio de tenacidade ao impacto – Charpy.....	67
4.3.4 Análise da fração volumétrica de ferrita.....	68
4.3.5 Análise macroestrutural.....	69
4.3.6 Análise microestrutural.....	70
4.3.7 Ensaio de resistência à corrosão – ASTM A262 (Prática A).....	71
4.3.8 Ensaio de resistência à corrosão – ASTM A262 (Prática E).....	72
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	73
5.1 ENSAIO DE TRAÇÃO.....	75
5.2 ENSAIO DE DOBRAMENTO.....	75
5.3 ENSAIO DE TENACIDADE AO IMPACTO – CHARPY .....	76
5.4 ANÁLISE DA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE FERRITA.....	77
5.5 ANÁLISE MACROESTRUTURAL .....	78
5.6 ANÁLISE MICROESTRUTURAL .....	80
5.6.1 MICROGRAFIAS DOS METAIS DE BASE.....	82
5.6.2 MICROGRAFIAS DAS SOLDAS.....	82
5.6.3 MICROGRAFIAS DAS ZONAS AFETADAS PELO CALOR (ZAC) .....	85
5.6.4 MICROGRAFIAS DOS CORPOS DE PROVA DE GOIVAGEM.....	86
5.6.4.1 MICROGRAFIAS DOS CORPOS DE PROVA DE GOIVAGEM A AR COM ELETRODO DE CARVÃO COM LIMPEZA POSTERIOR.....	89
5.7 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO – ASTM A262 (PRÁTICA A).....	91
5.7.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO PARA O CORPO DE PROVA SOLDADO PELO PROCESSO ARAME TUBULAR.....	91
5.7.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO PARA O CORPO DE PROVA SOLDADO PELO PROCESSO TIG.....	92
5.7.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO PARA O CORPO DE PROVA DE GOIVAGEM A AR COM ELETRODO DE GRAFITE COM LIMPEZA POSTERIOR... .....	93
5.8 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO – ASTM A262 (PRÁTICA E).....	94

5.8.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO PARA O CORPO DE PROVA SOLDADO PELO PROCESSO ARAME TUBULAR.....	94
5.8.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO PARA O CORPO DE PROVA SOLDADO PELO PROCESSO TIG.....	95
5.8.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO PARA O CORPO DE PROVA DE GOIVAGEM A AR COM ELETRODO DE GRAFITE COM LIMPEZA POSTERIOR... ..	96
6. CONCLUSÕES.....	98
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	100
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101

## **1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA**

A grande concorrência entre empresas tem forçado o desenvolvimento de novas tecnologias para aumentar a produtividade e melhorar a qualidade dos equipamentos com o menor custo possível objetivando-se a maximização do lucro final.

Devido a estas necessidades, faz-se cada vez mais necessária a otimização de processos de fabricação, é também de suma importância a correta escolha do processo de soldagem, optando assim por um processo que apresente as melhores características da junta soldada como propriedades físicas, químicas e mecânicas, além de assegurar excelente custo benefício.

No segmento industrial alimentício e petroquímico é comum a utilização de chapas de aços inoxidáveis A240 TP 316L. Para soldagem destes equipamentos é comum a dúvida sobre qual o processo mais adequado dentre os dois processos mais empregados (TIG com dupla fusão ou Arame Tubular), pois não se sabe ao certo qual deles apresenta melhor custo benefício, uma vez que cada processo apresenta vantagens de conhecimento empírico. Neste caso, optar por um destes processos torna-se muito complexo, por não se saber ao certo quais são realmente as vantagens e desvantagens na utilização de cada um deles, existem vários fatores que devem ser analisados e ponderados com dados mais refinados e ensaios laboratoriais de Tração, Dobramento, Ensaio de tenacidade ao impacto (Charpy), análise de fração Volumétrica de Ferrita, Análise Macroestrutural, Análise Micro estrutural, Ensaio de resistência à corrosão – ASTM A262 - Prática A, Ensaio de resistência à corrosão – ASTM A262 - Prática E.

Este trabalho se justifica com o objetivo de responder a essas e outras questões de maneira clara e efetiva, definindo a eficiência de cada processo, custo equipamento para cada processo, quantidade de soldadores necessários, verificação da qualidade de cada processo através de ensaios laboratoriais referidos anteriormente, tipos de goivagem, definição dos parâmetros de soldagem para cada processo e realização de ensaios não destrutivos como, líquido penetrante.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

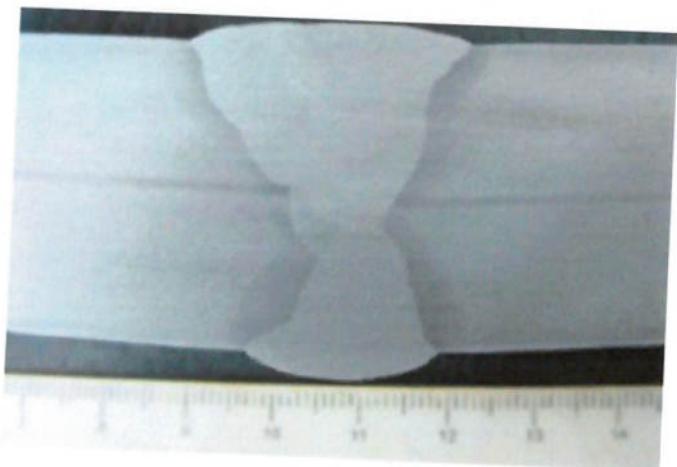
### **2.1 MÉTODOS DE UNIÃO DOS METAIS.**

Em relação aos métodos de união dos materiais há uma divisão em duas categorias principais, que são aqueles baseados no aparecimento de forças mecânicas macroscópicas entre as partes e também aqueles baseados em forças microscópicas [1]

No primeiro caso, do qual são exemplos de parafusagem a rebitagem, a resistência da junta é dada pela resistência do cisalhamento do parafuso ou rebite mais as forças de atrito entre as superfícies em contato. No segundo caso, a união é conseguida pela aproximação dos átomos e moléculas das partes a serem unidas, ou destas e material intermediário adicionado à junta, até distâncias suficientemente pequenas para a formação de ligações químicas, particularmente ligações metálicas e de Van der Waals [1].

## 2.2 DEFINIÇÃO DE SOLDAGEM.

Denomina-se soldagem ao processo de união de duas partes metálicas, usando uma fonte de calor, com ou sem pressão. A solda é o resultado desse processo [2]. A figura 2.1 representa um exemplo de uma junta de topo soldada sem pressão,

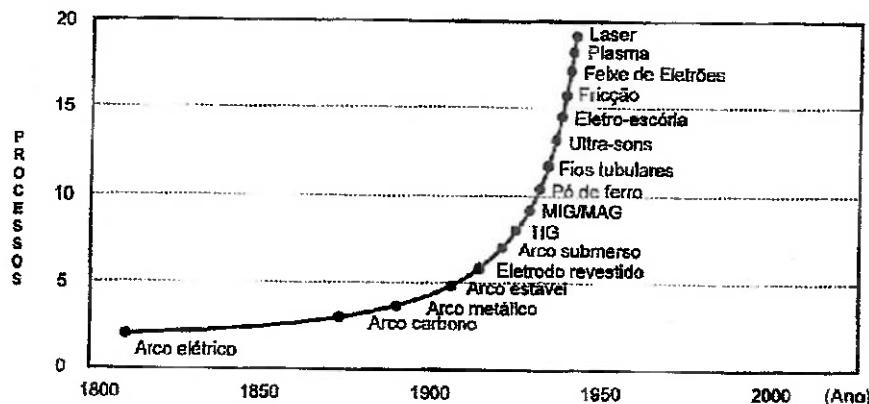


**Figura 2.1** – Junta de topo soldada [Cortesia NG].

## 2.3 PEQUENO HISTÓRICO DA SOLDAGEM.

Embora o processo de soldagem seja recente, com cerca de 100 anos, a brasagem e a soldagem por forjamento tem sido utilizadas desde épocas remotas. A soldagem foi usada na antiguidade e na idade média para a fabricação de armas e instrumentos cortantes [3].

O processo de soldagem foi impulsionado fortemente durante a segunda guerra mundial devido à fabricação de navios e aviões soldados [4]. A figura 2.2 apresenta um gráfico que demonstra a evolução dos processos de soldagem ao longo do tempo.



**Figura 2.2 - Evolução dos processos de soldagem ao longo do tempo [4].**

## 2.4 PROCESSOS DE SOLDAGEM.

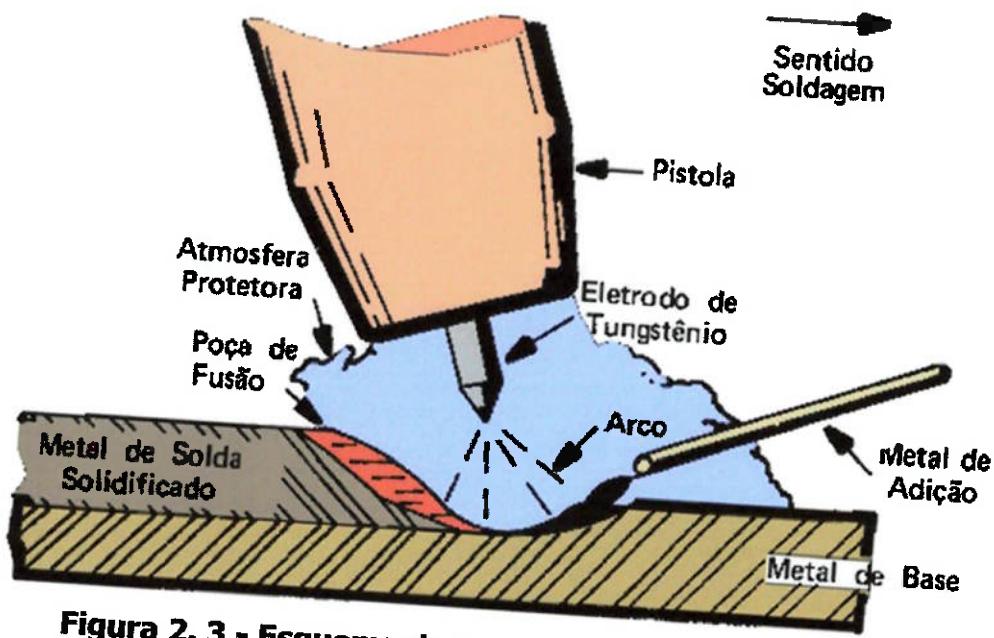
Segundo BRANDI, MELLO e WAINER (1992) [4] os processos de soldagem podem ser classificados pelo tipo de fonte de energia ou pela natureza da união. Dentre estes, os processos de soldagem a arco são os de maior importância industrial na atualidade. Devido à tendência de reação de material fundido com os gases da atmosfera, a maioria dos processos de soldagem por fusão utiliza algum meio de proteção para minimizar estas reações.

## 2.5 PROCESSO TIG

O processo TIG (Tungsten Inert Gas), também conhecido como GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) foi patenteado no fim dos anos 20, porém só passou a ser comercializado a partir de 1942 nos Estados Unidos.

O processo TIG é um processo de soldagem à arco elétrico mantido entre um eletrodo não consumível de tungstênio ou liga de tungstênio e a junta

a soldar. A poça de fusão é protegida através do fluxo de gás inerte. A soldagem pode ser executada com adição de material ou por soldagem autógena do metal de base (sem metal de adição). A figura 2.3 ilustra o esquemático do processo [4].



**Figura 2.3 - Esquema do processo TIG [Cortesia FBTS].**

Outras características básicas do processo TIG, como taxa de deposição, faixa de espessura, posições de soldagem, tipos de junta, diluição e faixa de corrente podem ser resumidas na tabela 2.1 a seguir.

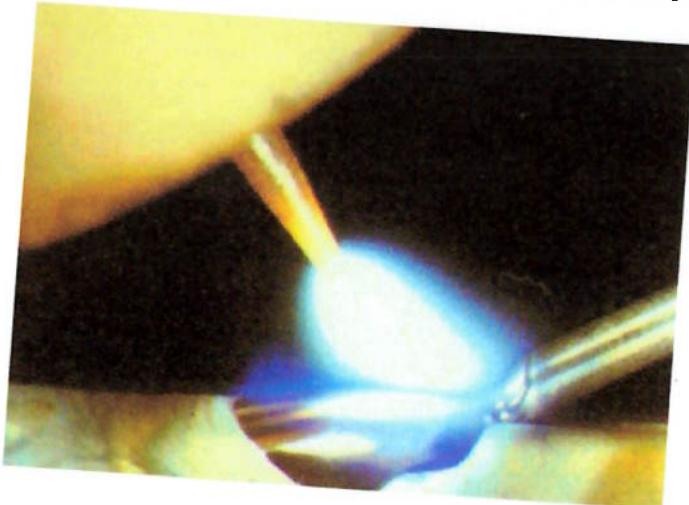
**Tabela 2.1 – Características do processo Soldagem TIG [23]**

<b>Taxa de deposição:</b>	0,2 a 1,3 kg/h
<b>Faixa de espessura:</b>	0,1 a 50, mm
<b>Posições de soldagem:</b>	Todas
<b>Tipos de junta:</b>	Todas
<b>Diluição com metal de adição</b>	2 a 20%
<b>Diluição sem metal de adição:</b>	100%
<b>Faixa de corrente:</b>	10 a 400 A

As variáveis que determinam basicamente o processo são a tensão do arco, a corrente de soldagem, velocidade de avanço e o gás de proteção. Deve-se considerar que as variáveis não agem especificamente de forma independente, havendo forte interação entre elas [5].

Os gases de proteção possuem várias funções [22] tais como: ionizar o arco, proteger a poça de fusão contra a contaminação pelo ar atmosférico e também estabilizar o arco elétrico. Pode-se citar como principais gases para utilização com o processo TIG o Argônio e o Hélio assim como a mistura entre eles. Como regra geral, pode-se afirmar que a corrente elétrica exerce na soldagem, dentre outras funções, o controle da penetração do cordão de solda.

A figura 2.4 ilustra a abertura do arco para o processo TIG manual.



**Figura 2. 4 - Arco Elétrico do Processo TIG [5].**

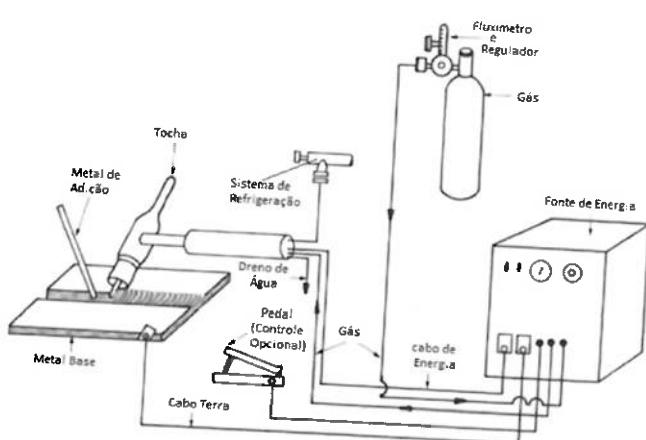
A penetração e a largura do passe são alteradas quando variamos a velocidade de avanço, como o custo do processo é determinado em função da velocidade do processo, é um importante fator a se considerar, entretanto dependendo dos padrões de qualidade na soldagem que se deseja obter esta variável torna-se apenas uma consequência do processo.

Outro fator de suma importância é o método de alimentação do metal de adição, pois a variação na velocidade da adição do consumível de soldagem pode influenciar desde a variação na quantidade de metal depositado em soldas automatizadas e mecanizadas, até o aspecto da solda acabada e o número de passes necessários para processos manuais.

O aspecto do cordão de solda está intimamente ligado com a velocidade de alimentação do metal de adição, pois uma vez que a velocidade é diminuída obtém-se perfis mais achatados e com maior penetração, enquanto que aumentando a velocidade de alimentação do metal de adição obtém-se perfis mais convexos e com uma menor penetração. Todavia a redução da velocidade de alimentação é limitada pela possibilidade do aparecimento de trincas de solidificação e falta de material.

## 2.5.1 EQUIPAMENTOS.

Os equipamentos básicos para a soldagem manual pelo processo TIG são mostrado na figura baixo:



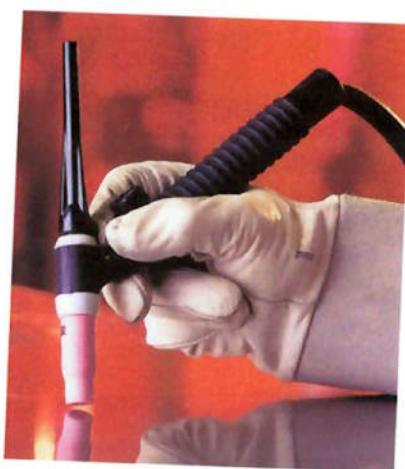
**Figura 2. 5 - Esquema de equipamentos do processo TIG [Cortesia FBTS].**

O processo TIG pode ser manual, mecanizado ou automatizado, o seu equipamento tem um custo de uma vez e meia o valor de referência de um equipamento para soldagem pelo processo Eletrodo Revestido, que chega a ser até dez vezes maior para um equipamento para soldagem automatizada.

### 2.5.1.1 TOCHA.

É o dispositivo que conduz a corrente elétrica, ela fixa o eletrodo de tungstênio e proporciona a proteção gasosa necessária à região círcundante do arco elétrico e da poça de fusão. A tocha TIG para soldagem manual pode ser refrigerada por ar ou água, dependendo intensidade de corrente de soldagem utilizada [2].

As denominadas tochas secas são limitadas aproximadamente a uma corrente de 200 A, enquanto que para correntes maiores que 200 A e limitadas a 1000 A, são utilizadas tochas refrigeradas (geralmente utilizadas no processo TIG automatizado). A figura 2.6 demonstra uma tocha utilizada para o processo TIG manual.



**Figura 2. 6** - Tocha para soldagem TIG manual [Cortesia Miller].

### 2.5.1.2 PINÇAS OU MANDRIL.

É de suma importância para refrigeração e transferência da corrente elétrica ao eletrodo que haja um perfeito contato entre a parte interna do mandril e o eletrodo. A função principal do mandril é realizar a correta fixação dos diversos tamanhos de eletrodos.

### 2.5.1.3 BOCAIS.

A função principal do bocal é direcionar o gás de proteção. A escolha do bocal correto para o diâmetro deve ser feita com cuidado, para assegurar que o gás de proteção tenha um escoamento o mais laminar possível, para uma dada vazão. Os bocais podem ser metálicos ou cerâmicos, ou quartzo fundido. De todos os tipos o metálico é o único que apresenta o uso restrito, pois não pode ser utilizado com corrente de alta frequência [2].

Existem bocais com difusor de gás (gas lens nose) que garantem um escoamento ideal (perfeitamente laminar), através de uma tela especial introduzida em seu interior [2]. A figura 2.7 ilustra um bocal cerâmico utilizado para o processo TIG.



**Figura 2.7** - Fluxo do gás de proteção bocal cerâmico TIG [Cortesia Miller].

#### 2.5.1.4 ELETRODOS.

Os eletrodos de tungstênio conhecidos também como eletrodos não consumíveis do processo TIG tem a função de gerar o calor que será fornecido ao processo atuando como um dos terminais do arco. Estes eletrodos tornam-se termoiônicos ao aproximarem-se de sua temperatura de fusão que é de aproximadamente 3410 °C, funcionando assim como fonte de elétrons para auxiliar na ionização da atmosfera do arco e na manutenção do arco elétrico.

Estes eletrodos sofrem um forte efeito de resfriamento devido a saída de elétrons em sua extremidade, e é graças a esse efeito que a ponta não se funde quando atinge altas temperaturas pelo efeito de aquecimento resistivo, eles são classificados com base em sua composição química [5].

Em relação aos métodos de fabricação os eletrodos podem ser produzidos através de acabamento mecânico ou químico com objetivo de remover todas as possíveis impurezas e imperfeições presentes na superfície. Para se evitar efeitos indesejáveis no eletrodo como erosão ou fundição deve-se atentar para que as capacidades de corrente dos eletrodos sejam respeitadas. Porem é necessário avaliar bem, pois correntes muito baixas podem gerar instabilidade do arco. Os diâmetros dos eletrodos que trabalham com corrente contínua com eletrodo no polo positivo são superiores aos eletrodos que trabalham com corrente contínua com eletrodo no polo negativo devido ao superaquecimento que o mesmo provoca, além de permitir correntes bem menores, cerca de 10% da aplicada para corrente contínua com eletrodo no polo negativo. Para corrente alternada essa redução de corrente é da ordem

de 50% menor que a corrente utilizada em corrente contínua com eletrodo no polo negativo [5].

#### *2.5.1.5 ELETRODOS DE TUNGSTÊNIO PURO.*

Devido ao fato de que os eletrodos de Tungstênio puro (99,5% W Mínimo) contribuem para uma boa estabilidade do arco ainda mantem a extremidade do eletrodo limpa e arredondada, estes são comumente utilizados em soldagem por corrente alternada, em contrapartida possuem capacidade de corrente menor que os eletrodos de liga de tungstênio [5].

#### *2.5.1.6 ELETRODOS LIGADOS.*

Como exemplo de os eletrodos de liga de tungstênio, podemos citar os eletrodos com óxido de tório, óxido de cério, óxido de lantânio e óxido de zircônio.

Os eletrodos com óxido de tório, (EWTh-1) e (EWTh-2), que possuem respectivamente 1% ou 2% de tória. A introdução deste óxido é para aumentar a emissividade termoiônica do tungstênio. Isto faz com que os mesmos possam trabalhar com correntes até 20% maiores do que as utilizadas pelos eletrodos de tungstênio puro. Este tipo de eletrodo não é recomendado para soldagem em corrente alternada devido a sua dificuldade em manter a extremidade do eletrodo arredondada, entretanto em corrente continua satisfazem um requisito muito importante na soldagem dos aços que é o de manter um perfil afiado da ponta do eletrodo durante a soldagem [5].

Os eletrodos com óxido de cério (EWCe-2), que, apesar de possuírem características muito similares aos eletrodos com tório, apresentam uma vantagem muito importante, pois não trabalham com elementos radioativos [5].

Os eletrodos com óxido de lantânia mantêm as mesmas características dos anteriores (contendo céria), enquanto os de óxido de zircônio (EWZr) possuem características de soldagem intermediárias quando comparadas com os eletrodos que contém tório e os puros, e são comumente utilizados na soldagem com corrente alternada. Neste caso combinam o aumento da emissividade termoionica do eletrodo de tungstênio com lantânia , o aumento da capacidade de corrente aplicada dos eletrodos toriados, e a capacidade de manter a ponta arredondada e estabilidade do arco na soldagem em corrente alternada, além da resistência à contaminação maior do que a dos eletrodos puros. Os eletrodos que possuem quantidades não especificadas de uma adição não especificada ou combinações de óxidos, ou até mesmo não se classificam nas designações acima são classificados como EWG [5].

#### *2.5.1.7 FONTES DE ENERGIA.*

As fontes utilizadas no processo TIG são sempre de corrente constante e pode ser um gerador, retificador ou transformador, dependendo da natureza do metal a ser soldado. Ela pode ter uma adaptação para soldagem manual, com pedal para controle da corrente pelo soldador. Com este recurso, o rechuve que se forma na cratera no final da soldagem é minimizado. Conforme o tipo de aplicação, a fonte de energia pode ser mais aprimorada, como o uso do arco pulsado em corrente contínua [2].

A escolha da fonte para TIG dependerá fortemente do tipo de corrente que será utilizada no processo, incluindo-se aí correntes senodais, correntes de onda quadrada, corrente contínua e corrente contínua pulsada.

#### *2.5.1.8 IGNITOR DE ALTA FREQUÊNCIA.*

Dispositivo facilitador da abertura do arco que gera, superposto à corrente de soldagem, um sinal de alta tensão e de alta frequência, com valores em torno de 3kV e 5kHz, que produz a ionização da coluna de gás entre o eletrodo e a peça, permitindo a abertura do arco com baixas tensões e a consequente passagem de corrente [4].

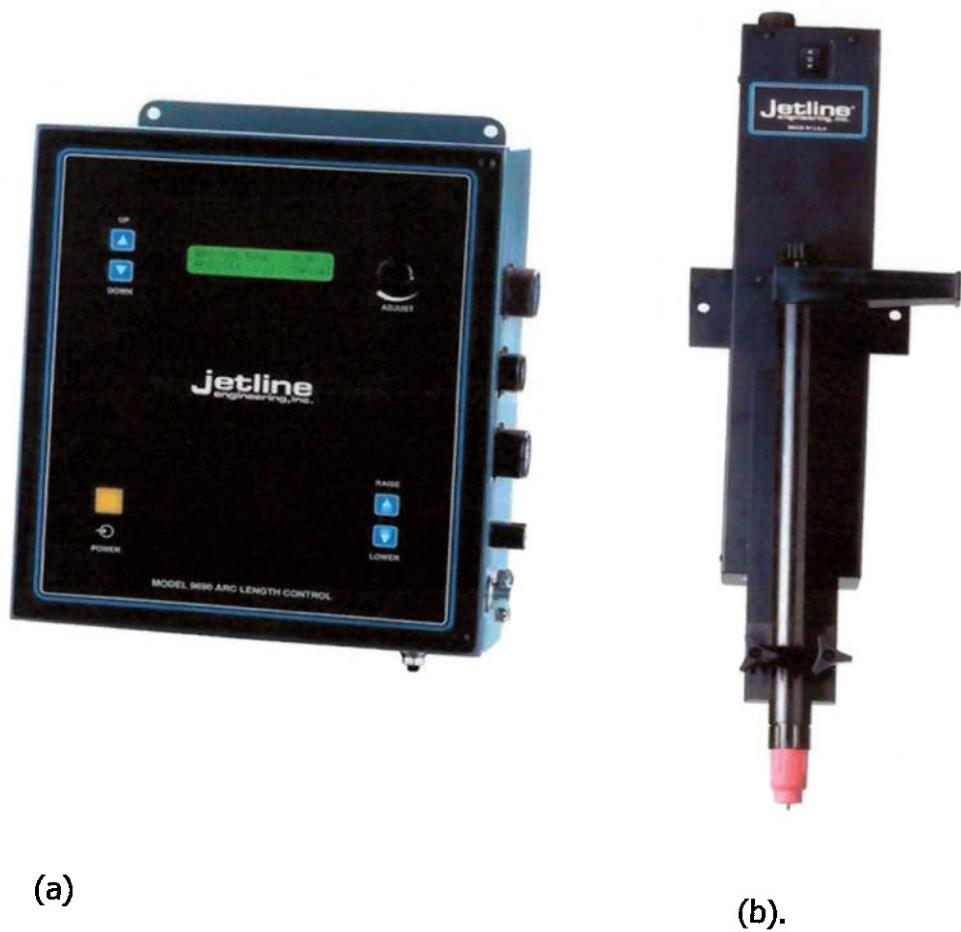
##### **✓ Corrente Contínua.**

No caso de corrente contínua de polaridade direta (eletrodo no polo negativo) há um fluxo de elétrons na direção do metal base e um fluxo de íons positivos na direção do eletrodo. Como os elétrons incidem no metal base, este se torna mais aquecido que o eletrodo, dando em consequência uma penetração grande e um cordão mais estreito.

No caso de corrente contínua de polaridade reversa (eletrodo no polo positivo), o fluxo de elétrons vai na direção do eletrodo e o fluxo de íons positivos na direção do metal de base. Neste caso, como os elétrons incidem no eletrodo, este se aquece mais que o metal base e por este motivo deve ter um diâmetro maior que o eletrodo utilizado na polaridade direta. A penetração neste caso é pequena e o cordão é mais largo [2].

✓ **Controle da tensão do arco.**

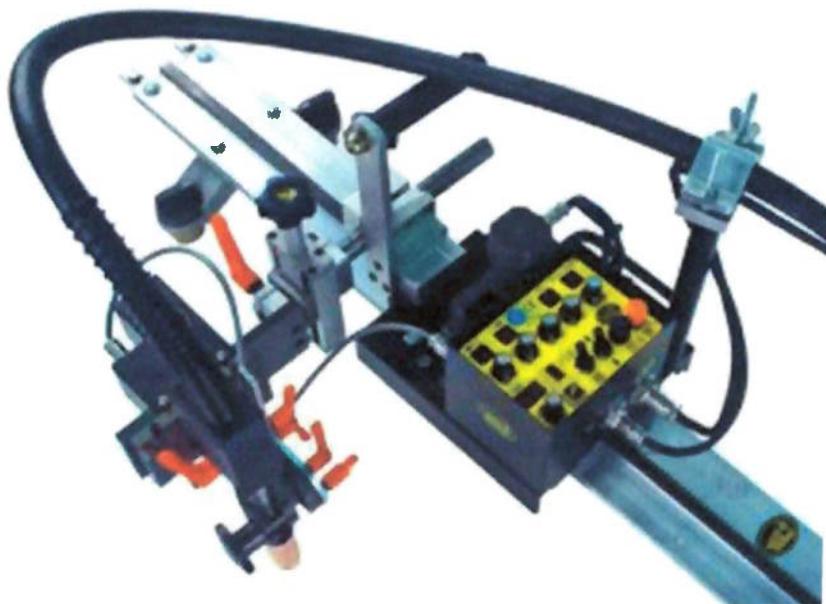
Este tipo de controle é empregado exclusivamente na soldagem TIG automatizada, uma vez que o comprimento do arco é controlado através do monitoramento do arco. Este controle é realizado através da comparação entre a tensão desejada e a tensão utilizada no processo, adequando a posição do eletrodo em relação ao metal de base. É bastante empregado na soldagem longitudinal de peças com perfis complexos e na soldagem circunferencial de tubulações. A figura 2.8 mostra um exemplo de controle automático da tensão.



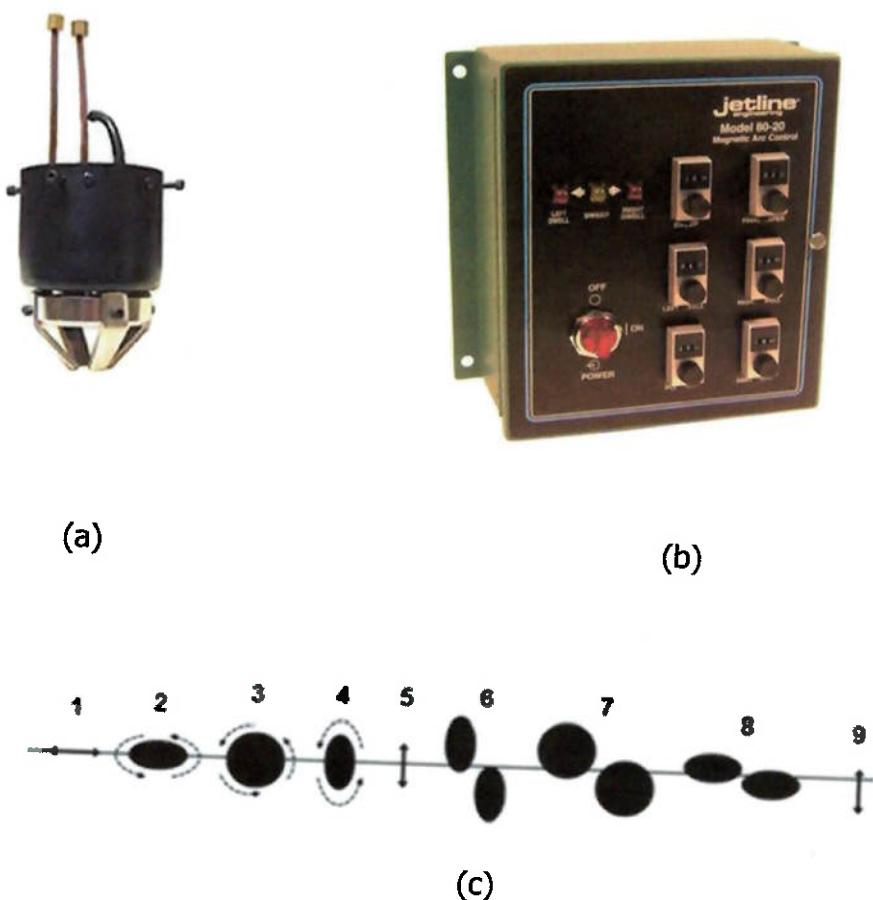
**Figura 2.8** – Exemplo de equipamento para controle automático da tensão do arco elétrico [cortesia Jetline].

✓ **Oscilação do arco.**

Com a montagem da tocha sobre um oscilador é possível aumentar a largura do cordão de solda através da oscilação mecânica da tocha ou oscilação magnética do arco elétrico. Defeitos como a mordedura da solda podem ser melhorados e até extintos através de oscilações provocadas mecânica ou magneticamente. No caso da soldagem com oscilação mecânica o eletrodo é movido para as laterais, podendo ter os mesmos tipos de oscilação que os soldadores manuais fazem ao realizar a soldagem de uma junta. A figura 2.9 apresenta um sistema de movimentação mecânica da tocha. Já para o caso da oscilação magnética, o arco pode ser movido lateralmente ou longitudinalmente sem a necessidade de mover o eletrodo, utilizando para isto uns eletroímãs que atuam no arco elétrico. A figura 2.10 ilustra um dispositivo destes.



**Figura 2. 9** – Exemplo de equipamento para controle mecânico da deflexão da tocha [cortesia Bug-O Systems].



**Figura 2. 10** – Exemplo de equipamento para controle magnético da deflexão do arco elétrico. (a) detalhe do deflector na tocha; (b) sistema de controle da deflexão e (c) tipos de deflexão do arco elétrico [cortesia Jetline Inc.].

✓ **Reservatório de gás.**

Cilindro de gás de proteção com reguladores de pressão e vazão de gás.

✓ **Sistema de refrigeração.**

É o dispositivo de refrigeração da tocha por meio de fluxo de água.

## 2.5.2 CONSUMÍVEIS

### 2.5.2.1 GÁS DE PROTEÇÃO

### 2.5.2.2 TIPOS DE GASES.

A principal função dos gases de proteção é estabilizar o arco, proteger a poça de fusão e transmitir a corrente elétrica.

Os gases utilizados na soldagem TIG são o argônio, o hélio ou suas misturas. Independente do gás de proteção, sua pureza deve ser de 99,99%. A utilização de argônio, hélio ou a mistura de ambos vai depender do tipo de liga que se está soldando e das características de soldagem [2].

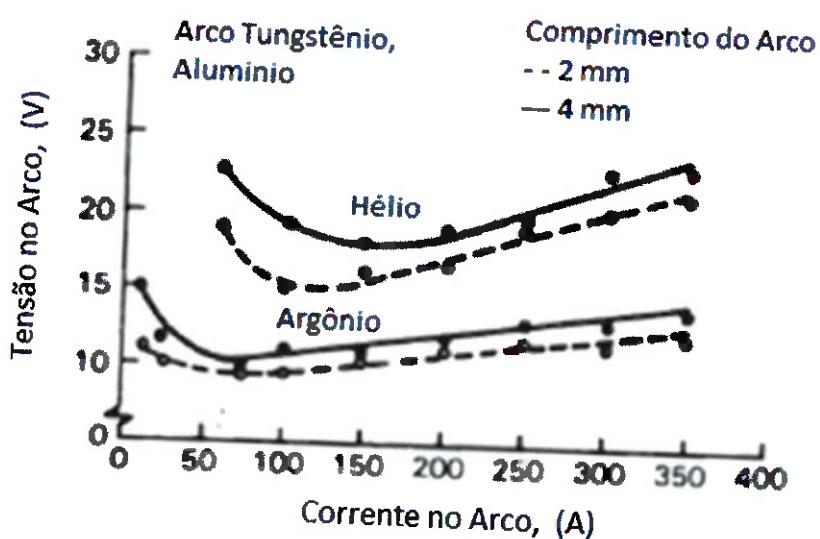
A pureza dos gases de proteção é também importante: a presença de vapor d' água deve ser mantida no valor máximo de 11 ppm por volume, o que corresponde a um ponto de orvalho de menos 60°C [2].

As principais características dos principais gases empregados no processo TIG estão descritas na tabela 2.2.

**Tabela 2. 2 - Características dos gases proteção para o processo TIG [2]**

ARGÔNIO	HÉLIO
Baixa tensão de arco	Elevada tensão de arco
Menor penetração	Maior penetração
Adequado à soldagem de chapas finas	Adequado à soldagem de grandes espessuras
Soldagem manual devido ao pequeno gradiente de tensão.	Soldagem automática
Maior ação de limpeza	Menor ação de limpeza
Arco mais estável	Arco menos estável
Fácil abertura do arco	Dificuldade na abertura do arco
Utilizado em CC e CA	Custo elevado
Custo reduzido	Vazão para proteção de 2 a 3 vezes maior que argônio
Vazão para proteção pequena	- Menor resistência à corrente de ar lateral
Maior resistência à corrente de ar lateral.	Adequado à soldagem de grandes espessuras

Em relação ao arco, as características dos gases são definidas pela sua curva tensão/corrente, como demonstra a figura 2.11 abaixo.



**Figura 2. 11 - Comportamento do Argônio e Hélio sobre a tensão/corrente [3]**

### 2.5.2.3 METAIS DE ADIÇÃO

O metal de adição comumente utilizado é o eletrodo nu, em forma de varetas para a aplicação manual ou em forma de arame para a aplicação mecanizada ou automatizada. Normalmente os metais de adição são similares ao metal de base, exceto pelos elementos adicionados especificamente para garantir a soldabilidade. Há uma variedade muito grande de metais de adição, praticamente para todos os tipos de aços e ligas metálicas presentes atualmente no mercado.

A escolha do metal de adição deve ser de acordo com o metal de base, de modo a garantir a compatibilidade metalúrgica, propriedades mecânicas (Resistência a Tração, Dureza, Tenacidade, etc.) e propriedades químicas (Resistência a Corrosão).

A AWS classifica os metais de adição para o processo TIG com base nos tipos de aplicação, conforme descrito a seguir: A5.7 – Varetas para Cobre e ligas de cobre, A5.9 - Varetas para Aços Inoxidáveis, A5.10 - Varetas para Alumínio e ligas de Alumínio, A5.13 – Varetas para revestimento superficial, A5.14 - Varetas para Níquel e ligas de Níquel, A5.15 – Varetas para Ferro Fundido, A5.16 - Varetas para Titânio e ligas de Titâneo, A5.18 - Varetas para Aços carbono, A5.19 - Varetas para Ligas de magnésio, A5.21 - Varetas para revestimento superficial de compostos, A5.22 - Varetas com núcleo fluxado de aço inoxidável, A5.24 - Varetas para Zircônio e ligas de Zirconio, A5.28 - Varetas para Aços Baixa liga, A5.30 - Varetas para insertos consumíveis.

### **2.5.3 - VANTAGENS, LIMITAÇÕES E APLICAÇÕES.**

As vantagens, limitações e aplicações estão descritas a seguir na tabela 2.3.

**Tabela 2. 3 - Vantagens, limitações e aplicações para o processo TIG [2]**

VANTAGENS	LIMITAÇÕES	APLICAÇÕES
Excelente controle da poça de fusão;	Processo com baixa taxa de deposição;	Soldagem de precisão e de elevada qualidade.
Permite soldagem com ou sem o uso de metal de adição;	Exige maior habilidade do soldador em comparação com os processos SMAW, GMAW e FCAW;	Soldagem de peças de pequenas espessuras e de tubulações de pequeno diâmetro.
Permite mecanização e automação do processo;	Dificuldade de manter a proteção gasosa em ambientes com corrente de vento;	Execução do passe de raiz em tubulações, tanques e vasos.
Pode ser usado em quase todos os metais, inclusiva juntas dissimilares;	Pode haver inclusões de tungstênio. Quando haver contato do mesmo com a poça de fusão;	Soldagem de ligas especiais, não ferrosas e materiais exóticos.
Produz soldas de alta qualidade e excelente acabamento, geralmente livres de defeitos;	Baixa tolerância a contaminantes no material de base ou adição;	
Gera pouco ou nenhum respingo;	Vazamento no sistema de refrigeração pode causar descontinuidades;	
Permite excelente controle na penetração de passes de raiz;	É menos econômico que os processos de eletrodos consumíveis para espessuras a 10mm;	
Utiliza-se de fontes de energia de baixo custo;	Emissão intensa de radiação ultra violeta;	
Controle preciso das variáveis de soldagem;		
Exige pouca ou nenhuma limpeza após a soldagem;		
Permite a soldagem de qualquer posição;		

### **2.5.4 MATERIAIS SOLDÁVEIS PELO PROCESSO.**

A maioria dos metais podem ser soldados pelo processo TIG, não sendo utilizado, entretanto, para soldar metais como cádmio, zinco e estanho devido à baixa pressão de vapor dos líquidos destes metais. De uma forma geral,

melhores resultados são obtidos com corrente contínua ligado no polo negativo, menos os casos específicos como o alumínio e o eletrodo mais utilizado é o toriado com 2%.

#### *2.5.4.1 AÇOS INOXIDÁVEIS.*

A adição de cromo aumenta a resistência a corrosão e a oxidação dos aços. Estes aços são muito importantes para engenharia em função de sua alta resistência a oxidação e a corrosão, sua tenacidade (dos aços inoxidáveis austeníticos) e as suas propriedades mecânicas a altas temperaturas.

Os aços com teores maiores do que 12% de cromo tem excelente resistência a corrosão e são designados como aços inoxidáveis. A composição mais comum de aços inoxidáveis (12% a 18% Cr + 8% Ni), foram desenvolvidas no começo do século XX por acidente [22].

A microestrutura destes aços tem efeito dominante sobre a propriedade destes aços, por este motivo eles são classificados com base em sua microestrutura na temperatura ambiente. Estes aços são classificados basicamente em cinco categorias, Ferríticos, Austeníticos, Martensíticos, Duplex e Endurecíveis por precipitação, sendo que iremos estudar em particular os aços Inoxidáveis austeníticos [22].

##### *2.5.4.1.1 Os Austeníticos.*

Os aços inoxidáveis auteníticos são ligas a base de Ferro, Cromo (16-30%) e Níquel (8-35%) predominantemente austeníticas após tratamento térmico. São não magnéticos. Incluem-se nesta família: AISI 301, 302, 304,

304L, 308, 310, 316, 316L, 317, 321 e 347. O teor de Carbono é em geral inferior a 0,08%. Estes aços possuem uma excelente ductibilidade e soldabilidade, aliada a uma elevada resistência a corrosão.

A estrutura austenítica (CFC) torna este tipo de aço muito versátil pois pode ser aplicado desde a área criogênica (por não sofrerem transição dúctil frágil) quanto para aplicações em elevadas temperaturas, em função de sua resistência a deformação a quente e ao amolecimento [22].

Quanto maior o teor de níquel presente no aço inox, menor é o risco do aparecimento da corrosão sob tensão, é por este motivo que o aço inox 316L é mais utilizado do que o 304 para equipamentos com este tipo de solicitação de resistência a corrosão sob tensão. Quando este tipo de aço é submetido a elevadas temperaturas (425 a 850°C) ocorre a precipitação do Cromo e do carbono, geralmente nos contornos de grão, isso provoca um empobrecimento de cromo nas regiões circunvizinhas, fenômeno este conhecido como sensitização [22].

A corrosão intergranular é advinda deste processo uma vez que quando os materiais sensitizados são expostos a meios ácidos estes sofreram corrosão, o que geralmente faz com que o grão acabe se destacando do material.

Apesar deste tipo de aço não ser magnético, quando são conformados a frio (estampagem ou laminação a frio), há uma transformação parcial da austenita em martensita o que pode gerar um caráter magnético.

## 2.5.5 TÉCNICAS DE SOLDAGEM TIG.

### 2.5.5.1 MÉTODOS DE INICIAÇÃO DO ARCO.

Na soldagem TIG o método mais comum para abertura do arco é o toque do eletrodo a superfície da peça, no entanto este método não é recomendado pois pode provocar efeitos indesejáveis na soldagem, tais como a contaminação do metal de solda e do metal de base (inclusão de tungstênio), além de danificar o próprio eletrodo.

A utilização de fontes de alta frequência permite que o gás seja ionizado e facilite a abertura do arco, porém este tipo de fonte gera uma grande quantidade de distúrbios na rede de alimentação elétrica [4],

A partida pulsada também pode ser utilizada, sendo obtida através de pulsos de alta tensão que ionizam o gás e permitem a abertura do arco, trabalhando via de regra com corrente iguais às de soldagem.

A partida através de arco piloto pode ser utilizada com fontes de corrente continua mantendo-se um arco entre o eletrodo e o bocal da tocha. Este arco piloto ioniza o gás necessário para estabelecer o arco. O arco piloto é alimentado por uma pequena fonte e é iniciado por alta frequência.

### 2.5.5.2 SOLDAGEM MANUAL.

Em TIG, quando se define a soldagem manual isso significa que uma pessoa irá controlar todas as funções do processo de soldagem, como a adição e o suprimento de gás, a soldagem manual utiliza a tocha, cabos e condutores

elétricos, pedal de pé (para controle de nível de corrente de soldagem) e controles de fluxo de gás.

Na soldagem manual, uma vez iniciado o arco, o eletrodo é movido circularmente até o estabelecimento da poça de soldagem. A tocha é então inclinada em 15 graus e é movida ao longo da junta para fundir progressivamente as superfícies. O material de adição é adicionado, se frio, no início da poça.

#### *2.5.5.3 SOLDAGEM MECANIZADA.*

A soldagem mecanizada é feita através de equipamento que produz a solda com a constante supervisão e controle do operador de solda. Os maiores custos deste processo têm de ser compensados pela maior produtividade e qualidade obtidas. Os processos ocorrem como um controle aberto de forma que os níveis pré-ajustados são mantidos durante o processo sem realimentação ou ajuste [4].

#### *2.5.5.4 SOLDAGEM SEMI-AUTOMÁTICA*

A soldagem semi-automática é definida como a soldagem na qual o único parâmetro automaticamente controlado é a alimentação do arame de adição, sendo o avanço da tocha realizado manualmente.

#### *2.5.5.5 SOLDAGEM AUTOMÁTICA*

A soldagem com equipamentos que auto-ajustam o processo sem a interferência de um operador são designadas como soldagem automática.

Algumas máquinas modernas deste tipo fazem correções nas variáveis de soldagem baseadas em informações obtidas durante o próprio processo.

#### 2.5.5.6 TÉCNICA TIG DUPLA FUSÃO

O processo de soldagem TIG DUPLA FUSÃO, é utilizado em algumas indústrias como processo primário de fabricação, principalmente em caldeirarias do ramo de açúcar e álcool. A alta produtividade e a garantia da penetração total na junta fazem do processo de soldagem DUPLA FUSÃO uma alternativa viável em relação a outros processos convencionais de soldagem. Esse processo é bastante aplicado em soldagem longitudinal e circunferências de materiais nobres como os inoxidáveis austeníticos e até mesmo os duplex.

É uma nova técnica do processo de soldagem TIG que vem sendo empregado ultimamente nos setores metalúrgicos, o qual a soldagem é realizada simultaneamente com duas tochas opostas no chanfro conforme mostra a figura 2.12.



**Figura 2.12** - Soldagem com o processo TIG dupla fusão.

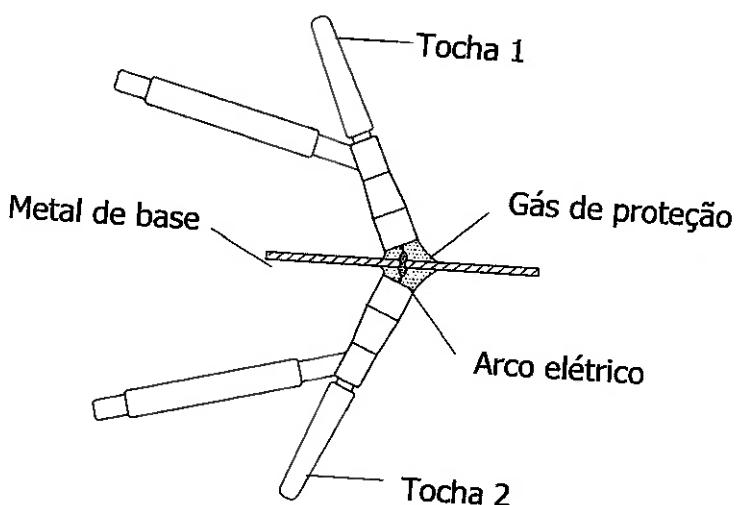
Os equipamentos utilizados para essa soldagem são os mesmos que para a soldagem manual, utiliza-se da mesma fonte, os mesmos consumíveis, apenas a técnica é diferente.

Nesse processo cada soldador terá uma regulagem de parâmetros. O Soldador que for adicionar material estará utilizando o parâmetro de corrente maior e o soldador que for fundir e proteger a raiz estará utilizando o parâmetro de corrente menor.

É muito importante a experiência dos soldadores envolvidos, assim como o entrosamento de ambos, pois os mesmos deverão ter velocidades de avanço idênticas.

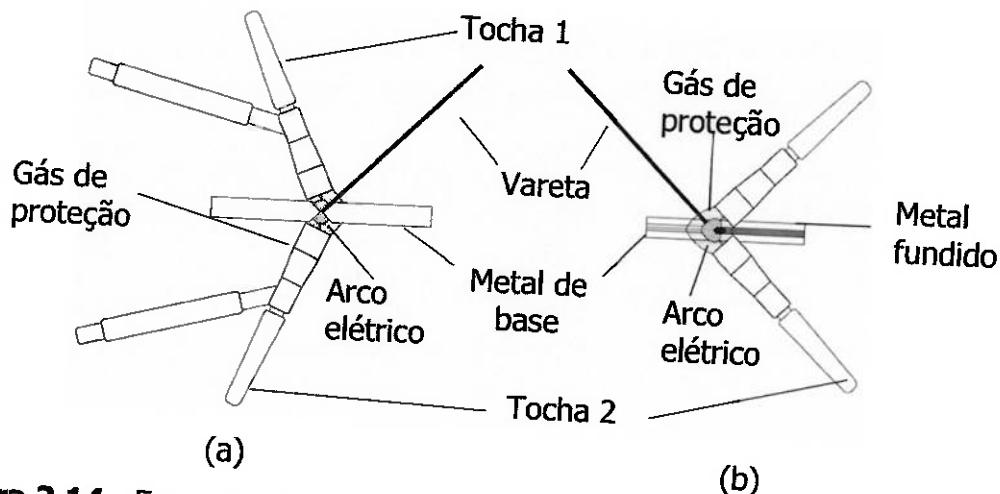
Esta técnica pode ser empregada de três maneiras:

- ✓ **Autógena:** Os arcos elétricos das duas tochas trabalhando em conjunto são responsáveis pela fusão do metal de base, também conhecido como caldeamento, sem adição de consumível, conforme mostra a figura 2.13. Aplicável para pequenas espessuras.



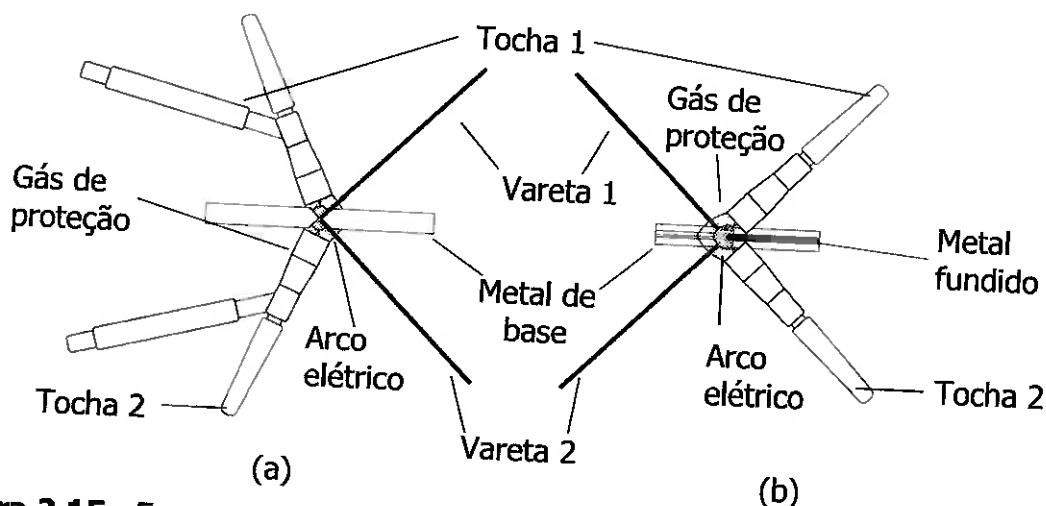
**Figura 2.13 - Esquema do processo TIG dupla fusão autógena.**

Com adição de material por um lado: Em um lado do chanfro é realizada a soldagem convencional, ou seja, com o arco elétrico proveniente da tocha com adição de consumível e do lado oposto uma tocha caldeando. Aplicável para passe de raiz de alta qualidade.



**Figura 2.14** - Esquema do processo TIG dupla fusão com adição de material por um lado. Em (a) vista lateral e em (b) vista superior.

Com adição de material por ambos os lados: Ambos os lados do chanfro contêm deposição de material. Aplicável para passe de raiz com qualidade e alta deposição (comparado com o TIG convencional).



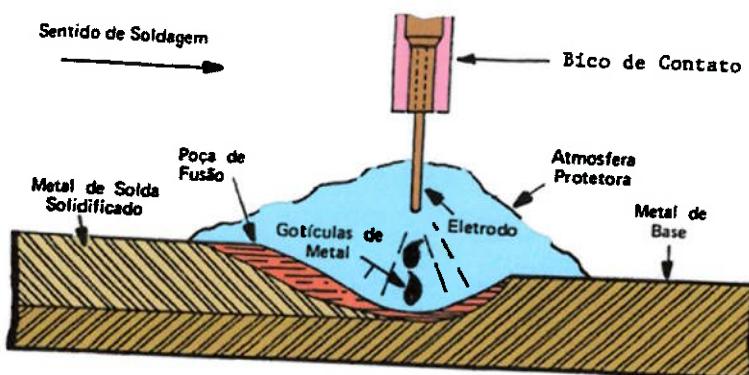
**Figura 2.15** - Esquema do processo TIG dupla fusão com adição de material pelos dois lados. Em (a) vista lateral e em (b) vista superior .

## 2.6 PROCESSO SOLDAGEM ARAME TUBULAR (FCAW).

O processo de soldagem por Arame Tubular (FCAW – Flux Cored Arc Welding) é semelhante ao processo GMAW, porém o eletrodo consumível é em forma tubular onde o espaço interno é preenchido por um fluxo que tem as mesmas características do revestimento do eletrodo do processo de Soldagem por Eletrodo Revestido [17].

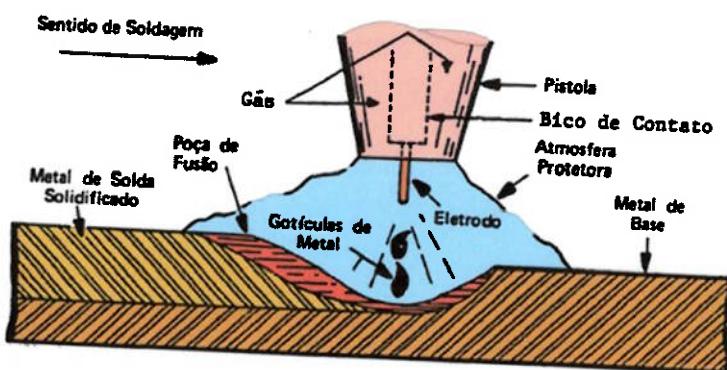
A soldagem por este processo pode ser realizado por duas maneiras:

- ✓ **Soldagem auto-protegida:** O fluxo fornece toda a proteção do arco elétrico.



**Figura 2.16** - Esquema processo FCAW sem proteção gasosa [Cortesia FBTS].

- ✓ **Soldagem com proteção gasosa:** Parte da proteção do arco elétrico é fornecida pelo gás de proteção.



**Figura 2.17** - Esquema processo FCAW com proteção gasosa [Cortesia FBTS].

Os arames tubulares foram desenvolvidos principalmente para atender à necessidade das empresas em manter sua competitividade, através do aumento da produtividade e da redução de custos.

Arames tubulares com gás de proteção para a soldagem de aços carbono foram desenvolvidos no início da década de 50, e tornaram-se comercialmente disponíveis em 1957. Nas décadas de 60 e 70 foi observado um substancial crescimento desse processo nos Estados Unidos, o mesmo ocorrendo no Japão na década de 80. Esse processo foi desenvolvido para combinar as melhores características da soldagem por arco submerso e a soldagem empregando o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) como gás de proteção. A combinação dos ingredientes do fluxo no núcleo do arame tubular aliada à proteção externa proporcionada pelo  $\text{CO}_2$  produz soldas de alta qualidade e um arco estável com um baixo nível de respingos. Inicialmente esses arames estavam disponíveis somente em grandes diâmetros (2,0 mm a 4,0 mm) e eram empregados nas posições plana e horizontal na soldagem de peças pesadas. Em 1972 foram desenvolvidos arames tubulares de pequeno diâmetro, constituídos de fluxo não metálico (flux-cored wires), para a soldagem em todas as posições, e isso aumentou sobremaneira o campo de aplicações para os arames tubulares.

Arames tubulares autoprotegidos (self-shielded wires) tornaram-se disponíveis logo após a introdução dos arames tubulares com gás de proteção externa, e ambos ganharam larga aceitação para aplicações específicas na indústria.

Na soldagem com arames tubulares são empregados invólucros metálicos com um pó em seu interior em vez de arames sólidos para unir

metais ferrosos. O fluxo em seu interior pode conter minerais, ferros-liga e materiais que forneçam gases de proteção, desoxidantes e materiais formadores de escória. Os ingredientes do fluxo promovem estabilidade ao arco, influenciando nas propriedades mecânicas do metal de solda, bem como no perfil da solda. Muitos arames tubulares são desenvolvidos para serem usados com uma proteção externa adicional. Os gases ricos em CO<sub>2</sub> são os mais comuns. O metal de solda pode ser depositado a taxas de deposição maiores, e os cordões de solda podem ser mais largos e com melhor perfil do que os produzidos com arames sólidos, mesmo tendo como gás de proteção o CO<sub>2</sub>.

O processo de soldagem empregando arames tubulares com gás de proteção externa é utilizado principalmente na soldagem de aços carbono e de baixa liga, produzindo altas taxas de deposição, alta eficiência de deposição e altos fatores operacionais.

Juntas soldadas com qualidade radiográfica são facilmente produzidas e o metal de solda, tanto para aços carbono, baixa liga ou inoxidáveis, apresenta boa ductilidade e tenacidade. Esse processo de soldagem é adequado a uma grande variedade de juntas e para todas as posições de soldagem.

Outra família de arames tubulares é a autoprotegida. Esses arames foram desenvolvidos para gerar gases de proteção a partir de adições no fluxo, de modo similar aos eletrodos revestidos. Arames tubulares autoprotegidos não exigem proteção gasosa externa e podem ser aplicados tanto com corrente contínua eletrodo positivo (CC+) como com corrente contínua eletrodo negativo

(CC-). Arames tubulares autoprotegidos podem ser empregados sob ventos moderados com perturbações mínimas na atmosfera protetora em torno do arco [7].

Adicionalmente, os arames tubulares mais modernos apresentam um teor de hidrogênio difusível muito baixo e uma alta resistência à reabsorção de umidade, reduzindo, com isso, os custos com ressecagem.

Algumas características básicas do processo Arame Tubular (FCAW), como taxa de deposição, faixa de espessura, posições de soldagem, tipos de junta, diluição e faixa de corrente podem ser resumidas a seguir na tabela 2.4 .

**Tabela 2. 4 - Características processo Soldagem Arame Tubular [24].**

<b>Taxa de deposição:</b>	1 a 18,0 kg/h
<b>Faixa de espessura:</b>	> 3,0 mm
<b>Posições de soldagem:</b>	Todas
<b>Tipos de junta:</b>	Todas
<b>Diluição com metal de adição</b>	20 a 50%
<b>Faixa de corrente:</b>	90 a 600 A

Assim como o processo GMAW, o FCAW é semi-automático e os equipamentos são basicamente o mesmo, porém o processo FCAW possui apenas algumas mudanças no sistema de alimentação de arames, onde ao invés da utilização de roldanas lisas como é o caso dos arames sólidos é recomendada a utilização de roldanas recartilhadas, especialmente desenvolvidas para arames tubulares. Esta necessidade se deve pelo fato do arame tubular ser mais flexível que o arame sólido. Desta maneira é aconselhável uma menor pressão no sistema de tracionamento.

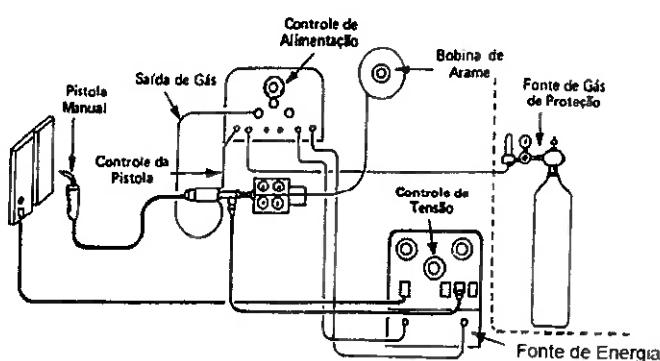
Segundo AWS (1978), os principais benefícios do FCAW é a combinação da alta produtividade do processo contínuo de soldagem com os benefícios metalúrgicos derivados do fluxo, ou seja, este processo tem os benefícios combinados dos processos, Eletrodo Revestido, Mig-Mag e Arco Submerso.

## 2.6.1 EQUIPAMENTOS

Os equipamentos para soldagem a arco por Arame Tubular são: Retificador, Gerador, Pistola, Unidade de alimentação de arame, unidade de deslocamento (para processo automático) e cilindro de gás (Dual Shield).

O processo é utilizado principalmente no modo semi-automático, embora, mais recentemente, o seu uso no modo automático, através de robôs industriais tenha crescido muito. O seu equipamento básico inclui fonte de energia, cabos, tocha de soldagem, alimentador de arame e seu sistema de controle, bobina de arame (eletrodo), fonte de gás de proteção com regulador de vazão, ferramentas e material de segurança.

Os equipamentos básicos para a soldagem Semi-Automático pelo processo FCAW é mostrado na figura 2.18.



**Figura 2.18 - Esquema de equipamentos do processo FCAW [Cortesia FBTS].**

Os fabricantes que utilizam arame sólido cobreado necessitam de argumentos mais convincentes, já que se concentram basicamente no maior preço do arame tubular. No entanto, empregando-se programas mais avançados e modernos de cálculo dos custos da soldagem, frequentemente prova-se que a diferença de preço do consumível é mais do que compensada pelos ganhos de produtividade, especialmente quando predomina a soldagem nas posições plana e horizontal.

Outros argumentos que suportam o uso de arames tubulares em substituição a arames sólidos são o risco reduzido de defeitos de falta de fusão lateral, maior penetração, menos respingos e uma menor probabilidade de ocorrência de porosidade.

✓ **Quanto ao tipo de Operação.**

Podem ser classificados em Semi automático ou automático.

✓ **Quanto ao custo do equipamento.**

Comparando-se o custo de um equipamento para soldagem a arco com eletrodo revestido com o equipamento para soldagem por Arame Tubular, o equipamento soldagem com arame Tubular custa em média três vezes mais.

A tocha para soldagem FCAW possui um contato elétrico deslizante (bico de contato) para transmitir a corrente ao arame, orifícios para a passagem de gás de proteção e bocal para dirigir o fluxo de gás à região do

arco e da poça de fusão. Para a soldagem semi-automática, ela ainda possui um interruptor para o acionamento da corrente de soldagem, da alimentação de arame e do fluxo de gás de proteção.

O sistema de alimentação é composto de um motor, um sistema de controle de sua velocidade e um conjunto de roletes responsável pela impulsão do arame.

Em comparação com a soldagem com eletrodos revestidos, a soldagem FCAW é relativamente mais simples quanto à sua técnica de execução, pois a alimentação de metal de adição é feita pelo equipamento e a quantidade de escória gerada é mínima. Por outro lado, este processo é mais complicado em termos da seleção e ajuste de seus parâmetros devido ao seu maior número de variáveis e a forte inter-relação entre elas. São variáveis importantes do processo:

- Diâmetro e composição do arame,
- Tipo do gás de proteção,
- Velocidade de alimentação do arame,
- Vazão do gás de proteção,
- Comprimento do eletrodo e distância da tocha à peça,
- Posicionamento da tocha em relação à peça,
- Corrente de soldagem,
- Tensão de soldagem,
- Velocidade de soldagem,
- Indutância (características dinâmicas) da fonte,
- Técnica de manipulação.

A composição do arame é escolhida em função de algumas variáveis como: tipo de metal de base, propriedades desejadas para a solda e do tipo de gás de proteção. O tipo de arame é, em geral, indicado com base em classificações dadas por normas de especificação. O diâmetro do arame é escolhido principalmente em função da espessura do metal de base, da posição de soldagem e de outros fatores que limitem o tamanho da poça de fusão ou o aporte de calor na solda. Para cada diâmetro e composição de arame, existe uma faixa de corrente adequada à sua utilização, isto é, para a qual a estabilidade do processo e as condições de formação do cordão de solda são satisfatórias [1]

A corrente de soldagem controla fortemente a velocidade de fusão do arame. Além disso, a penetração, o reforço e a largura do cordão tendem a aumentar com a corrente quando as demais variáveis são mantidas constantes.

## **2.6.2 CONSUMÍVEIS**

### **2.6.2.1 GÁS DE PROTEÇÃO**

### **2.6.2.2 TIPOS DE GASES.**

A proteção gasosa tem como função proteger a poça de fusão, estabilizar o arco elétrico e transmitir a corrente elétrica. Dentre as diversas opções de gases disponíveis utiliza-se mais frequentemente o CO<sub>2</sub> e misturas deste com Argônio. Os mesmos são utilizados conforme especificação do eletrodo.

As misturas mais comumente utilizadas são:

- ✓ CO<sub>2</sub>
- ✓ Ar + 2% de O<sub>2</sub>
- ✓ Ar + 18 A 25% de CO<sub>2</sub>

### **2.6.3 METAIS DE ADIÇÃO.**

O metal de adição é também denominado eletrodo, que na verdade arames tubulares ocos com alma formada por um fluxo fusível com baixo teor de hidrogênio. Quando o gás protetor for de natureza ativa, devem estar presentes na composição química do eletrodo elementos desoxidantes, tais como Mn e o Si. No caso de arames auto protegidos, existe na composição química do fluxo a presença do Al.

A AWS classifica os metais de adição para o processo Arame Tubular com base nos tipos de aplicação, A5.20 – Aço carbono, A5.22 – Aço inoxidável, A5.29 – Baixa Liga.

Os eletrodos tubulares para soldagem a arco de aço-carbono (AWS A 5.20) estão classificados com base nas propriedades mecânicas do metal de solda, na condição de “como soldado”, posição de soldagem, uso ou não de uma proteção externa, a adequabilidade para aplicações de um único passe, ou em passes múltiplos, tipo de corrente.

Os arames tubulares e varetas de núcleo fluxado para soldagem de aços resistentes a corrosão, ao cromo e ao cromo-níquel (AWS A 5.22) estão classificados com base na composição química do metal de solda, posição de

soldagem, meio de proteção empregado durante a soldagem, tipo de corrente utilizada.

Os eletrodos tubulares para a soldagem a arco de aços baixa liga (AWS A 5.29) são classificados com base nas propriedades mecânicas do metal de solda, posição de soldagem, uso de gás para proteção externa, tipo de corrente, composição química do metal depositado ou metal de solda não diluído.

#### **2.6.4 VANTAGENS, LIMITAÇÕES E APLICAÇÕES**

As vantagens, limitações e aplicações estão descritas a seguir na tabela 2.5.

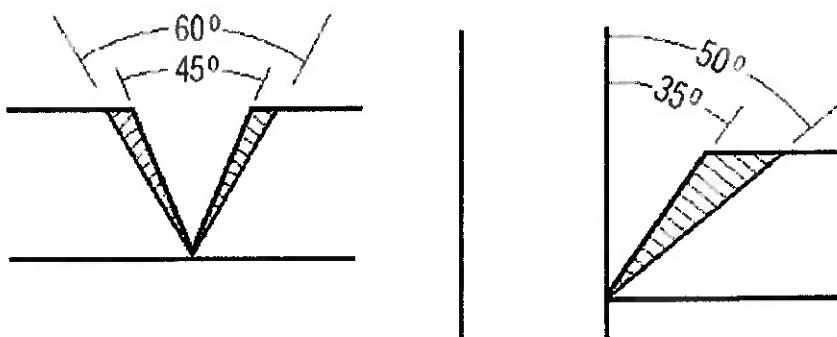
**Tabela 2.5 - Vantagens, limitações e aplicações para o processo Arame Tubular [23]**

VANTAGENS	LIMITAÇÕES	APLICAÇÕES
Alta taxa de deposição	Aplicações somente em aços carbonos e aços inoxidáveis	Soldagem de estruturas metálicas;
Ótimo acabamento	Soldagem fora de posição restrita a transferência por curto circuito ou arco pulsante	Soldagem de polidutos.
Baixo teor de hidrogênio combinado com alta energia		Soldagem de vazos de pressão e tanques de armazenamento, etc...

#### **2.6.5 TÉCNICAS DE SOLDAGEM PARA O PROCESSO ARAME TUBULAR.**

A preparação da peça de trabalho na maioria dos casos os ângulos de chanfro podem ser reduzidos quando se emprega arames tubulares. Por exemplo, uma junta de topo com chanfro em V em que se empregaria um ângulo de 60º para a soldagem MIG / MAG ou com eletrodos revestidos sofreria

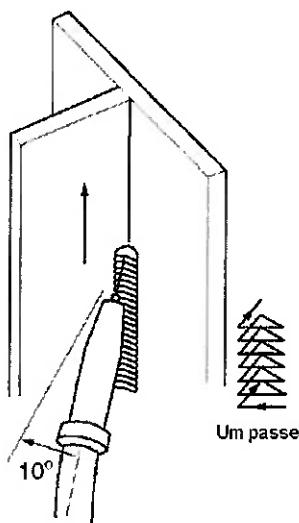
uma redução para 45° na soldagem com arames tubulares. Isso reduziria a quantidade de material depositado, gerando assim maior produtividade.



**Figura 2.19** - Chanfro para processo Arame Tubular x Arame sólido [7].

#### 2.6.5.1 - SOLDAGEM EM JUNTAS DE ÂNGULO NA VERTICAL DESCENDENTE

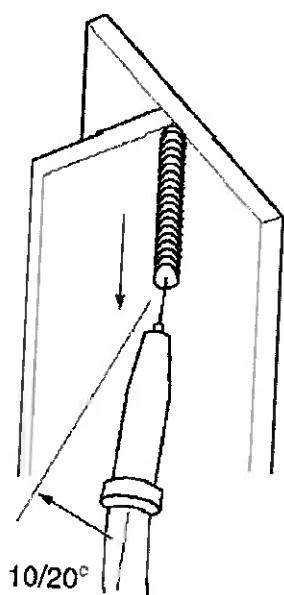
Recomenda-se a oscilação triangular para filetes com um único passe.



**Figura 2.20** - Juntas de ângulo na posição vertical Ascendente [7].

#### 2.6.5.2 - SOLDAGEM EM JUNTAS DE ÂNGULO NA VERTICAL ASCENDENTE.

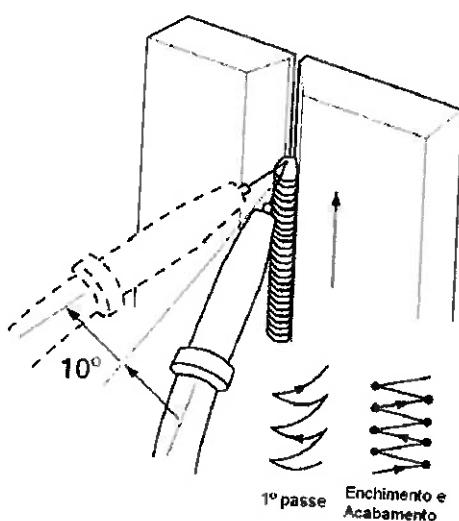
Recomenda-se a oscilação triangular para filetes com um único passe.



**Figura 2.21** - Juntas de ângulo na posição vertical descendente [7].

#### 2.6.5.3 - JUNTAS DE TOPO NA POSIÇÃO VERTICAL ASCENDENTE

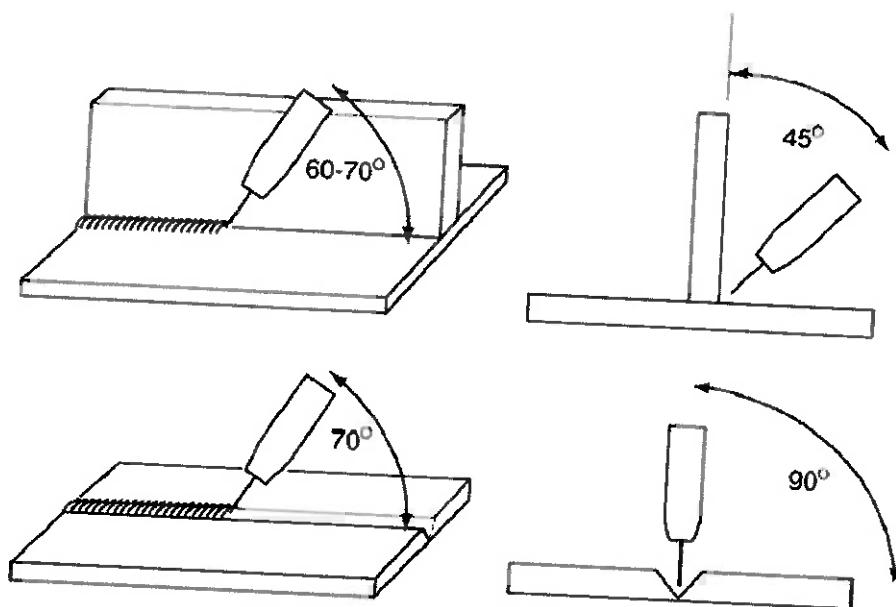
Pode ser utilizado um ângulo de  $10^\circ$  acima da horizontal para realização do passe de raiz. O objetivo seria auxiliar a estabilidade do arco e o controle de penetração.



**Figura 2.22** - Juntas de topo na posição vertical ascendente [7].

#### 2.6.5.4 - ÂNGULO DE TOCHA:

Para a soldagem com arames tubulares com fluxo não-metálico, o ângulo de ataque da tocha medido entre o eixo do arame e a linha da junta deve ser entre  $60^\circ$  e  $70^\circ$  (técnica “puxando”), com o arame apontando para a solda já executada. Isso evita que a escória passe a frente da poça de fusão reduzindo o risco de ocorrer descontinuidades. A técnica de soldagem “puxando” deve ser levada em consideração principalmente na soldagem com arame tubulares do tipo flux cored e do tipo autoprotegido. Já para a soldagem com arames tubulares do tipo metal cored recomenda-se a utilização da técnica de soldagem “empurrando”. Tal técnica proporciona menores valores de penetração, mas resulta em uma melhor distribuição do metal de solda, fator este que melhora a aparência do cordão soldado. A soldagem utilizando a técnica “puxando” também pode ser usada, o que garante aumento na penetração [7].



**Figura 2.23 - Ângulo de tocha [7].**

Tipo de soldagem e polaridade: De forma geral deve ser utilizado corrente contínua sendo a tocha de soldagem ligada diretamente no polo positivo da fonte. Alguns arames auto-protégidos devem ser soldados com corrente contínua e a tocha sendo ligada no polo negativo da fonte.

## **2.7 GOIVAGEM.**

A goivagem é um processo de remoção de material, seja na construção ou na manutenção de estruturas e equipamentos. Principalmente na soldagem, a goivagem é utilizadas na remoção do cordão de solda, seja para reparo ou como técnica de construção, está última utilizada na remoção do passe de raiz para garantir a penetração total [8].

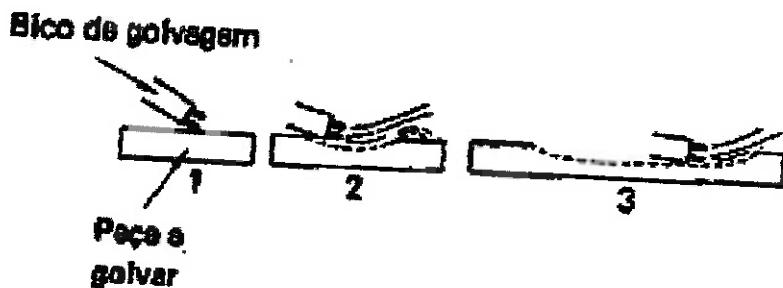
### **2.7.1 TIPOS DE GOIVAGEM**

A goivagem está intimamente ligada à operação de soldagem, serve para fazer a limpeza de raiz, remover cordões de solda com defeito e fazer pequenos ajustes na hora da montagem de equipamentos. Existem basicamente quatro tipos de goivagem: goivagem a gás, goivagem a arco elétrico com ar comprimido, goivagem por usinagem e goivagem por esmerilhamento.

#### **2.7.1.1 GOIVAGEM A GÁS.**

A goivagem a chama consiste em um bico inclinado entre 25 a 35° em relação à superfície da chapa. O material que fica líquido com o aquecimento da

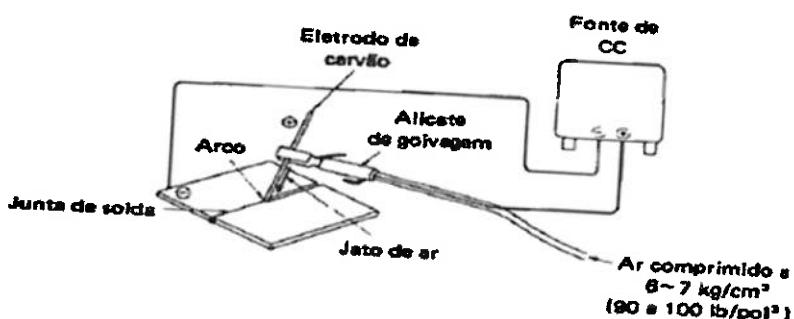
chama é expulso com jato de oxigênio de alta pressão como mostra na figura 2.24 [8].



**Figura 2.24 - Goivagem a Chama [8].**

#### 2.7.1.2 GOIVAGEM A ARCO

A goivagem a ar com arco elétrico consiste em um eletrodo de carvão ligado a uma máquina retificadora, que utiliza corrente contínua com polaridade inversa. Nesta máquina instala-se uma tocha onde é preso o eletrodo de carvão e nesta mesma tocha tem dois furos para saída de ar comprimido. O eletrodo de carvão ao entrar em contato com a chapa abre um arco elétrico que forma uma poça de metal líquido que é expulsa pelo ar comprimido no mesmo tempo da abertura do arco, como mostra a figura 2.25 ilustrativa [8].



**Figura 2.25 - Goivagem a arco elétrico [8].**

Fazendo uma comparação entre o processo de goivagem a gás e o processo a arco, o processo a arco deixa uma zona afetada pelo calor (ZAC)

menor que processo a gás e uma melhor qualidade de goivagem. Esta diferença faz com que hoje em dia o processo de goivagem a arco seja o mais utilizado. Como mostra figura 2.26.



**Figura 2.26** - Goivagem a arco elétrico .

#### *2.7.1.3 GOIVAGEM POR MEIO MECÂNICO: USINAGEM*

A goivagem por usinagem é feita em materiais de grandes espessuras onde não tem acesso para fazer a limpeza para posteriores ensaios não destrutivos. Esta goivagem também é feita em materiais como, por exemplo, aços inoxidáveis, aços de média e de alta liga, onde pode contaminar se com Carbono se for utilizado eletrodo de grafite [8].

#### *2.7.1.4 GOIVAGEM POR MEIO MECÂNICO: ESMERILHAMENTO*

A goivagem por esmerilhamento é feita normalmente em chapa de pequenas espessuras, devido à facilidade. Também executa goivagem por esmerilhamento em materiais especiais como aço inoxidável [8].

### **3. OBJETIVOS**

Este trabalho tem como objetivo, comparar com embasamento teórico e experimental qual dos processos TIG com dupla fusão ou Arame Tubular com goivagem com eletrodo de grafite e com posterior limpeza manual por esmerilhamento com lixadeira elétrica, apresenta melhor qualidade. Estes processos serão empregados na soldagem de chapas em aço inoxidável ASTM A240 Tp. 316L com 9,5 mm de espessura, de uma junta de topo com chanfro em "V", utilizados em equipamentos para indústria alimentícia e petroquímica, uma vez que cada um desses processos apresentam vantagens com base em conhecimentos empíricos.

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS.**

### **4.1 MATERIAIS.**

#### **4.1.1 METAL DE BASE.**

O metal de base utilizado foi o ASTM A240 Tp. 316L, para a realização dos experimentos foram preparados 02 corpos de prova para comparação da goivagem convencional e dois corpos de prova para comparação entre a soldagem TIG com dupla fusão e Arame tubular com goivagem na raiz. Todos os corpos de prova possuem a mesma rastreabilidade da chapa de 9,5 mm de espessura com objetivo de assegurar a mesma composição química e propriedades mecânicas. As composições químicas e propriedades mecânicas destes materiais foram fornecidas pelos fabricantes e constam nas tabelas 4.1 e 4.2.

**Tabela 4.1 - Composição química dos materiais utilizados.**

DESIGNAÇÃO	C	Mn	P	Si	S	Cr	Ni	Mo	N	Cu
A240 Tp. 316 L	0,03	2	0,05	0,75	0,03	16,0 18,0	10,0 14,0	2,0 3,0	0,1	0,08

**Tabela 4.2 – Propriedades mecânicas dos materiais utilizados.**

DESIGNAÇÃO	Limite de escoamento (N/mm <sup>2</sup> )	Resistência à tração (N/mm <sup>2</sup> )	Alongamento (%)
A240 Tp.316L	361	595	40

#### **4.1.2 CONSUMÍVEIS DE SOLDAGEM E GOIVAGEM**

Para o processo TIG foi utilizado como metal de adição a vareta para aço inoxidável ER 316 L, com diâmetro de 2,5 mm, cuja composição química e propriedades mecânicas, fornecidas pelo fabricante, constam nas tabelas 4.3 e 4.4.

**Tabela 4.3** - Composição química da vareta utilizada.

DESIGNAÇÃO	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu
A240 Tp. 316 L	0,03	1,8	0,5	19	12,5	2,8	0,3

**Tabela 4.4** - Propriedades mecânicas da vareta utilizada.

DESIGNAÇÃO	Limite de escoamento (N/mm <sup>2</sup> )	Resistência à tração (N/mm <sup>2</sup> )	Alongamento (%)
ER 316L	470 MPa	650 MPa	32

Para o processo ARAME TUBULAR foi utilizado como metal de adição o arame tubular para aço inoxidável E 316L T1-4/1, com diâmetro de 1,2 mm, cuja composição química e propriedades mecânicas, fornecidas pelo fabricante, constam nas tabelas 4.5 e 4.6.

**Tabela 4.5** - Composição química do arame tubular utilizado.

DESIGNAÇÃO	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
E 316L T1-4/1	0,03	1,5	0,6	19	12	2,8

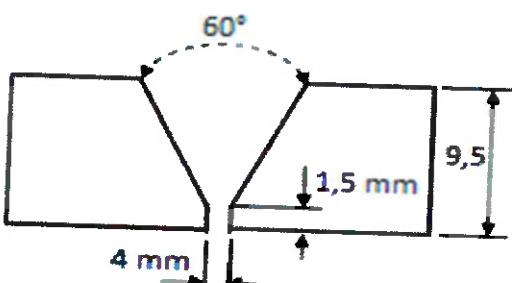
**Tabela 4.6 - Propriedades mecânicas do arame tubular utilizado.**

DESIGNAÇÃO	Limite de escoamento (N/mm <sup>2</sup> )	Resistência à tração (N/mm <sup>2</sup> )	Alongamento (%)
E 316L T1-4/1	400	560	35

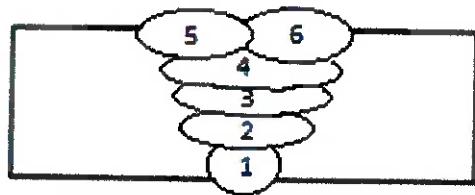
Para Goivagem com eletrodo de carvão foi utilizado eletrodo com diâmetro de 6,35 mm.

## 4.2 PARÂMETROS UTILIZADOS

No primeiro corpo de prova foi utilizado o processo de soldagem TIG, usando corrente contínua polaridade direta (CC-). As chapas foram preparadas com chanfro em V, bisel de 30°, abertura de raiz de 4,0mm e face de raiz de 1,5mm. A geometria da junta pode ser observada na figura 4.1.

**Figura 4.1 - Representação da junta para o processo TIG.**

A soldagem foi realizada na posição plana e Horizontal. O preenchimento da junta foi realizado em seis passes e cinco camadas, conforme ilustrado na figura 4.2.



**Figura 4.2** - Representação do preenchimento da junta, com sequência de passes.

Foram executado o passe de raiz e posteriormente os passes de acabamento com controle de temperatura interpasso menor que 150°C. A figura 4.3 mostra a soldagem dos CP's e a figura 4.4 representa os corpos de prova após soldagem. A soldagem da raiz foi executada por dois soldadores, utilizando o processo TIG com dupla fusão, onde os dois soldadores depositam metal de adição, ao mesmo tempo, na mesma poça de fusão. Foram feitos dois cordões de solda de 400mm cada.

Foram utilizadas para soldagem máquinas com fonte corrente constante, destinadas a soldagem pelo processo TIG e Eletrodo Revestido.



**Figura 4.3** - Soldagem dos corpos de prova (TIG).



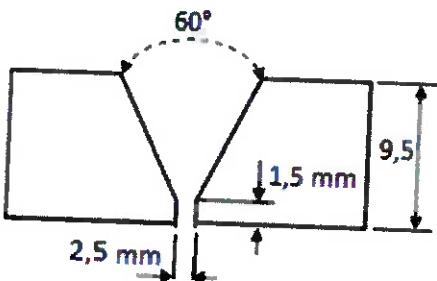
**Figura 4.4** - Foto do corpo de prova (TIG) soldado.

Na tabela 4.7, estão apresentados os parâmetros de soldagem utilizados na junta soldada.

**Tabela 4.7** - Parâmetros de soldagem.

Eletrodo de Tungstênio (tipo / diâmetro)	EWTh-2 Ø2,5 mm					
Ângulo de afiação do eletrodo de Tungstênio	60°					
Gás de proteção	Argônio 99,99%					
Vazão	15 L/min					
Processo	TIG (D.F)	TIG	TIG	TIG	TIG	TIG
Passe	1	2	3	4	5	6
Camada	1	2	3	4	5	6
Diâmetro (mm)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Corrente (A)	88	136	140	132	112	124
Tensão (V)	10,4	12,7	12,9	11,8	12	10,8
Temperatura Inicial (°C)	22	26,4	30	35	35	60
Temperatura Final (°C)	115	117	118	120	117	127
Aporte de calor (J/cm)	0,549	1,219	1,445	0,742	0,806	0,618
Velocidade (cm/min)	10	8,5	7,5	12,6	10	13
Largura Passe (mm)	5	9	11,5	12,4	10	10
Altura do passe (mm)	2,5	3,2	2,3	1	1,5	1,5
Tempo de arco aberto (min:s)	04:36	05:04	05:52	03:43	04:23	03:58
Quantidade de consumíveis (g)	47,97	44,5	57,1	20,1	18,65	22,2

No segundo corpo de prova foi utilizado o processo de soldagem Arame Tubular, usando corrente contínua polaridade reversa (CC+). As chapas foram preparadas com chanfro em V, bisel de  $30^\circ$ , abertura de raiz de 2,5mm e face de raiz de 1,5mm. A geometria da junta pode ser observada na figura 4.5.



**Figura 4.5** - Representação da junta.

A soldagem foi realizada na posição plana e horizontal. O preenchimento da junta foi realizado em cinco passes e quatro camadas, conforme ilustrado na figura 4.6



**Figura 4.6** - Representação do preenchimento da junta, com sequência de passes.

Foram executados o passe de raiz (1) e posteriormente o passe 2, em seguida foi realizada a goivagem do lado oposto conforme figura 4.8 e após a realização do ensaio por líquido penetrante conforme figura 4.9 e 4.10 foi realizada a soldagem do passe 5 em seguida foram realizados os passes de enchimento e acabamento com controle de temperatura interpasso menor que 150°C. A figura 4.7 mostra a soldagem dos CP's e a figura 4.11 representa os

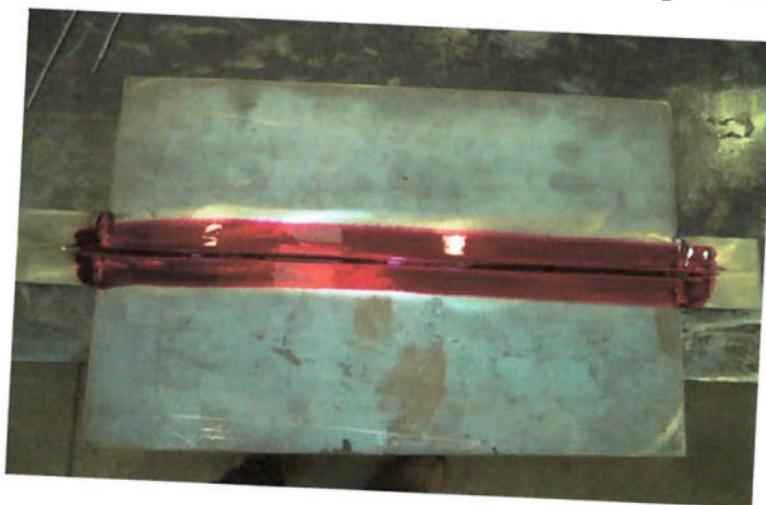
corpos de prova após soldagem. Foram utilizadas para soldagem as máquinas para soldagem Mig Mag com corrente pulsada.



**Figura 4.7** - Foto do corpo de prova soldado (Arame Tubular).



**Figura 4.8** - Foto do corpo de prova (tubular goivado).



**Figura 4.9** - Foto da aplicação do penetrante.



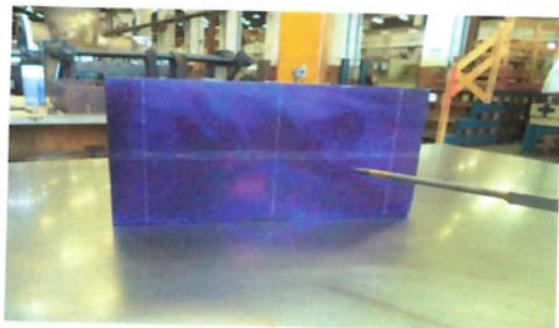
**Figura 4.10** - Foto da aplicação da revelação do penetrante.



**Figura 4.11** - Foto do corpo de prova soldado (Arame Tubular).

No terceiro corpo de prova foi realizada a goivagem a ar com eletrodo de grafite, utilizando corrente contínua polaridade direta (CC-). O corpo de prova foi preparado numa chapa de 250 mm x 150 mm x 10 mm de espessura e fabricado com usinagem das laterais para garantir o peso aproximadamente igual de cada CP, posteriormente foram traçados conforme figura 4.12 com objetivo de assegurar a realização da goivagem na linha de centro na largura e profundidade pré-estabelecida, assim como corte após a goivagem.

Posteriormente o corpo de prova foi pesado antes e após a realização da goivagem conforme figuras 4.13 e 4.14 e após o seccionamento em duas parte para elaboração dos corpos de prova de goivagem a ar com eletrodo de carvão com limpeza posterior conforme figuras 4.15 e 4.16,



**Figura 4.12** - Foto da traçagem do corpo de prova.



**Figura 4.13** - Foto da pesagem do corpo de prova antes da goivagem.



**Figura 4.14** - Foto da pesagem do corpo de prova após a goivagem.

## **4.3 ENSAIOS REALIZADOS.**

### **4.3.1 ENSAIO DE TRAÇÃO.**

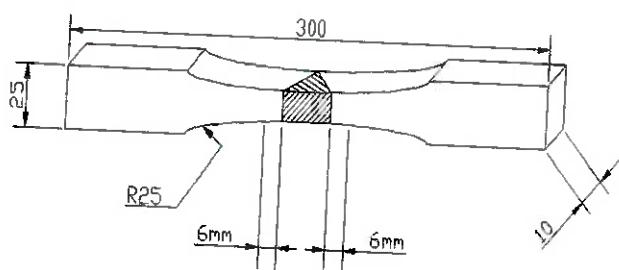
Os ensaios de tração foram realizados em corpos de prova de tração transversal, conforme QW-150 do ASME IX 2013 QW-462.1 (figura 4.17).

Foram retirados dois corpos de prova de cada Junta soldada e dois corpos de prova do metal de base. Os corpos de prova foram usinados nas dimensões mostradas na figura 4.17. Os corpos de prova TR1 e TR2 correspondem ao metal base, os corpos de prova TR3 e TR4 correspondem a junta similar (A240 Tp.316L) soldada pelo processo TIG com dupla fusão, já os corpos de prova TR5 e TR6 correspondem a junta similar (A240 Tp.316L) soldada pelo processo Arame Tubular com goivagem posterior na raiz.

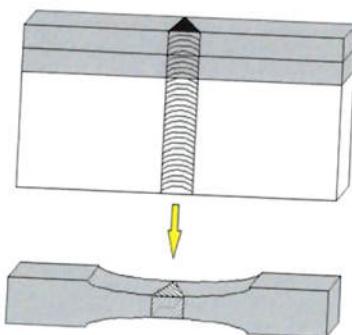
Para o ensaio de tração foi utilizada uma máquina universal de ensaio marca EMIC modelo PL 6000 do tipo eletro-hidráulica conforme figura 4.15.



**Figura 4.15 - Máquina utilizada para realizar o ensaio de tração.**



**Figura 4.16** - Dimensões dos CP's para ensaio de tração



**Figura 4.17** - Retirada dos corpos de prova para tração.

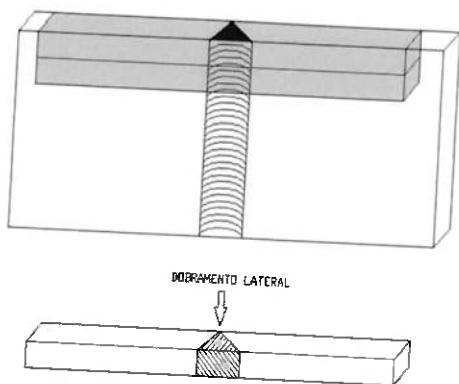
#### 4.3.2 ENSAIO DE DOBRAMENTO.

Os ensaios de dobramento foram conduzidos conforme QW-160/162 do ASME IX 2013. A máquina utilizada para realizar o Dobramento está representada na figura 4.18.



**Figura 4.18** - Máquina utilizada para realizar o ensaio de Dobramento.

Como o ensaio de dobramento pode ser realizado em qualquer ponto e em qualquer direção do material, ele é um ensaio localizado e orientado, e o corpo de prova foi devidamente preparado com a orientação para dobramento lateral a 180° conforme ASME IX 2013 QW-462.2 (a) Lateral como representado na figura 4.19, utilizando-se de cutelo de 40,0 mm e abertura da base com 63,1 mm. A temperatura foi controlada em 24 °C.



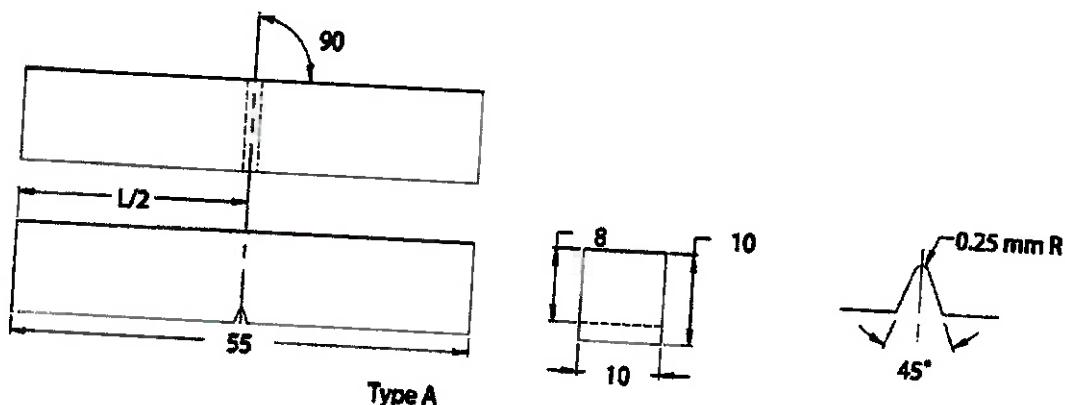
**Figura 4.19** - Retirada dos corpos de prova para dobramento.

#### **4.3.3 ENSAIO DE TENACIDADE AO IMPACTO – CHARPY.**

No intuito de analisar a tenacidade da zona fundida e da linha de fusão dos CPs, foi aplicado ensaio de impacto Charpy, a usinagem de todos os CPs de forma reduzidos com o dimensional de 10 x 10 x 55 mm e entalhe "V", foi preparado conforme a norma ASTM E23 como representado na figura 4.21 com temperatura de - 60°C, com resfriamento através de nitrogênio líquido diluído em álcool. A localização do entalhe para o ensaio foi determinada por meio de ataque químico para identificação da ZAC, a 4.20 representa a máquina utilizada para o ensaio.



**Figura 4.20** - Máquina utilizada para realizar o ensaio de Charpy.

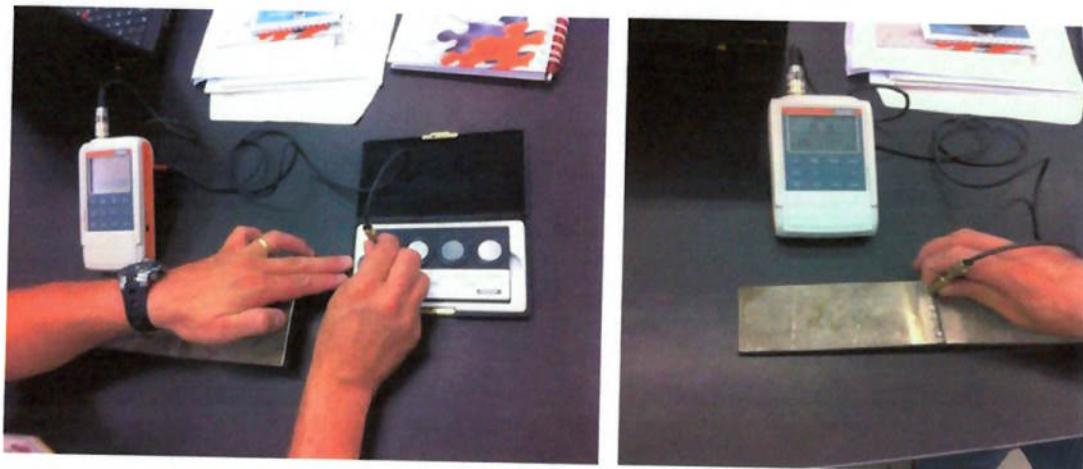


**Figura 4.21** - Detalhe dos sets de Impacto.

Foram testados 5 CP's com 3 sets para cada uma das condições Zona Fundida e linha de fusão e metal de base.

#### 4.3.4 ANÁLISE DA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE FERRITA.

Para medir a fração volumétrica de ferrita nos metais de base e na face e raiz dos cordões de solda foi utilizado um ferritoscópio marca FERRITOSCOPE modelo FMP30 conforme figura 4.22.



**Figura 4.22 – Ferritoscópio.**

#### **4.3.5 ANÁLISE MACROESTRUTURAL.**

A realização da análise macroestrutural dos cordões de solda do aço inoxidável, foi feita em seções cortadas com dimensões de 10 x 10 x 90 mm dos cordões de solda originais. Em seguida realizou-se uma preparação na face das amostras com lixas de diferentes granulométricas. A sequência de granulométrica das lixas foi: 50, 220, 320, 400, 600 e 1200, lavando sempre a amostra antes de passar para outra lixa.

Uma vez obtida a superfície totalmente polida o material foi submetido a ataque químico com uma solução para aços inoxidáveis austeníticos denominada Água régia modificada, como reagente foi utilizado ácido clorídrico P.A. (HCL). (20 ml).

A aquisição de imagens foi feita utilizando Microscópio estereoscópico TOPCON, como apresentado na figura 4.23.



**Figura 4.23 - Microscópio estereoscópico.**

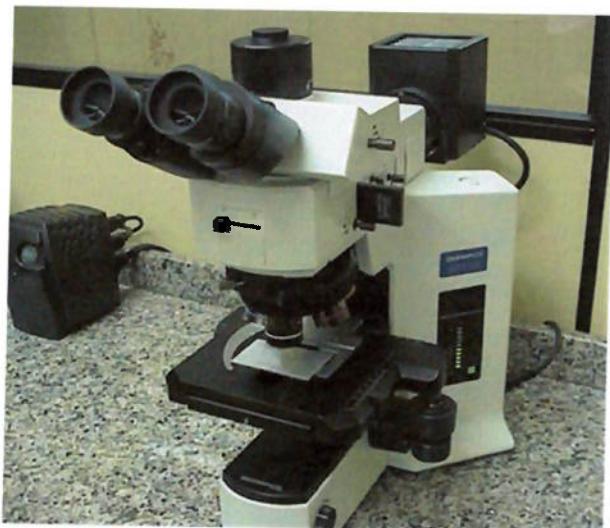
#### **4.3.6 ANÁLISE MICROESTRUTURAL.**

A realização da análise microestrutural dos cordões de solda, foi feita em seções cortadas com dimensões aproximadas de 10 x 10 mm dos cordões de solda originais e das regiões goivadas, e em seguida foram montadas ao quente em baquelite. Terminado o processo de montagem realizou-se uma preparação na face das amostras com lixas de diferentes granulométricas. A sequência de granulométrica das lixas foi: 180, 220, 320, 400, 600 e 1000 "meshes" e polidas com pasta de diamante na sequência: 6, 3 e 1  $\mu\text{m}$  de tamanho médio de partícula. Posteriormente, foi realizado um polimento automático usando uma suspensão de sílica coloidal, com tamanho médio de partícula de 0,06  $\mu\text{m}$ .

Uma vez obtida a superfície totalmente polida o material foi submetido a ataque eletrolítico utilizando ácido oxálico 10% (NaOH), com tempo aproximado

de 120s e uma tensão de 3V. O equipamento utilizado para o ataque foi uma fonte de tensão continua da marca DAWER.

A aquisição de imagens foi feita utilizando a câmera digital SH318111 acoplada no microscópio de marca Olympus BX51M, como apresentado na figura 4.24.



**Figura 4.24 - Microscópio óptico.**

#### **4.3.7 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO – ASTM A262 (PRÁTICA A).**

A susceptibilidade à corrosão intergranular referente ao aço inoxidável austenítico foi avaliada pela norma ASTM A262 prática A, utilizando como solução para ataque eletrolítico ácido oxálico.

As amostras da junta foram preparadas conforme o procedimento de metalografia convencional, sendo as amostras levadas até o polimento final com pasta de diamante de granulometria de 1um e atacadas eletroliticamente em solução aquosa contendo 10%  $H_2C_2O_4 \cdot 2H_2O$  (ácido oxálico), a uma

densidade de corrente de  $1A/cm^2$ , durante aproximadamente 90s, e, então, realizou-se análise microestrutural com microscopia ótica.

#### **4.3.8 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO – ASTM A262 (PRÁTICA E).**

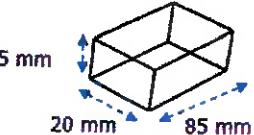
As amostras foram submetidas ao tratamento térmico de sensitização durante 1h na temperatura entre 650 a 675°C. Os corpos de prova foram usinados de acordo com a tabela 4.8, em seguida foram limpos com álcool antes do teste.

O corpo de prova foi introduzido em uma solução de Sulfato de Cobre Cúprico e Ácido Sulfúrico, em seguida foram colocadas granulhas de cobre eletrolítico no fundo do recipiente e também na superfície do corpo de prova e aquecida através da chapa elétrica a temperatura de ebulição, a temperatura da solução foi controlada através do acionamento do controlador. O ensaio teve a duração de 24 horas consecutivas.

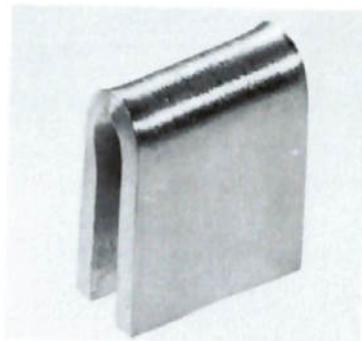
Após o período do ensaio, o corpo de prova foi retirado da solução ( $CuSO_4 \cdot 5H_2O + H_2SO_4 + H_2O$ ), lavado com água em abundância e em seguida lavada com álcool e secado utilizando um secador. O tempo de ensaio foi medido através de um software no microcomputador.

Finalmente foi realizado o dobramento do corpo de prova a  $180^\circ$  para fazer em seguida à análise no microscópio estereoscópico.

**Tabela 4.8 - Dimensões dos corpos de prova.**

TABELA – Dimensões dos corpos de prova para ensaios		
Tipo de material	Dimensões do corpo de prova	Representação gráfica
<b>Forjados, tiras, placas ou produtos laminados</b>	Espessura maior que 5 mm (3/16 pol.) De 5 a 13 mm (3/16 a 1/2 pol.) de espessura com 9 a 25 mm (3/8 a 1 pol.) de largura, e 75 mm (3 pol.) mínimo de comprimento <sup>(B)</sup> .	

A aquisição de imagens foi feita utilizando a câmera digital SH318111 acoplada no microscópio de marca Olympus BX51M, como apresentado na figura 4.24. A foto do corpo de prova após o dobramento é apresentada na figura 4.25.

**Figura 4.25 - Corpo de prova pratica E.**

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.**

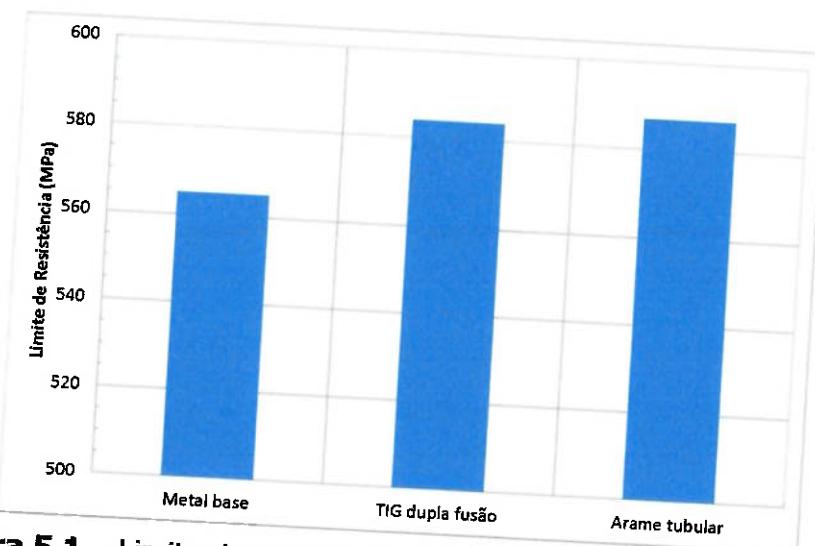
### **5.1 ENSAIO DE TRAÇÃO.**

A tabela 5.1 apresenta os resultados obtidos no ensaio de tração para os corpos de prova soldados pelo processo Arame Tubular com goivagem posterior na Raiz, pelo processo TIG com Dupla Fusão, assim como o do Metal Base. Foi utilizado como critério de aceitação o QW-153 do ASME IX 2013. Os limites mínimos de resistências foram obtidos através do ASME II parte A 2013.

**Tabela 5.1 - Resultados dos ensaios de Tração.**

Processo de Soldagem	CP	Largura (mm)	Espessura (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Limite de Resistência Especificado (MPa)	Limite de resistência Obtido (MPa)	Carga ruptura (N)	Tipo de fratura e Localização
Metal Base	TR1	12,5	10,2	127,5	485 Min.	565	-	Dúctil
TIG (Dupla Fusão)	TR1	19,08	10,05	191,8	485 Min.	581	111.409	Dúctil / Rompeu no Metal Base
	TR2	18,95	9,9	187,6	485 Min.	587	110.124	Dúctil / Rompeu no Metal Base
Arame Tubular	TR1	18,88	9,6	181,2	485 Min.	589	106.775	Dúctil / Rompeu no Metal Base
	TR2	19,05	9,8	186,7	485 Min.	585	109.214	Dúctil / Rompeu no Metal Base

A figura 5.1 mostra os valores médios obtidos para o limite de resistência.



**Figura 5.1 – Limite de resistência do metal base e das juntas soldadas.**

O QW-153 do ASME IX 2013, especifica que a amostra deve ter uma resistência à tração que não seja inferior ao limite de resistência mínimo especificado para o metal de base. Portanto, conforme os resultados apresentados na tabela 5.1 os corpos de prova obtiveram resultados satisfatórios e foram considerados aprovados no ensaio de tração. Pode-se observar que não houve a influência dos diferentes processos de soldagem no limite de resistência, uma vez que era esperado um limite de resistência menor para o processo arame tubular devido a influencia das micro inclusões.

## **5.2 ENSAIO DE DOBRAMENTO.**

A tabela 5.2 apresenta os resultados obtidos no ensaio de tração para os corpos de prova soldados pelo processo Arame Tubular com goivagem posterior na Raiz e pelo processo TIG com Dupla Fusão. Foi utilizado como critério de aceitação o QW-163 do ASME IX 2013.

**Tabela 5.2 - Resultados dos ensaios de Dobramento.**

Processo de Soldagem	CP	Largura (mm)	Espessura (mm)	Resultado
TIG (Dupla Fusão)	DL1	10	10	Isento de descontinuidades
	DL2	10	10	Isento de descontinuidades
	DL3	10	10	Isento de descontinuidades
	DL4	10	10	Isento de descontinuidades
Arame Tubular	DL1	10	10	Isento de descontinuidades
	DL2	10	10	Isento de descontinuidades
	DL3	10	10	Isento de descontinuidades
	DL4	10	10	Isento de descontinuidades

O QW-163 do ASME IX 2013, especifica que a amostra deve ter a solda e a ZAC completamente dentro da porção dobrada e ser isenta de descontinuidades na região da solda e da ZAC. Portanto, conforme os resultados apresentados na tabela 5.2 os corpos de prova obtiveram resultados satisfatórios e foram considerados aprovados no ensaio de Dobramento.

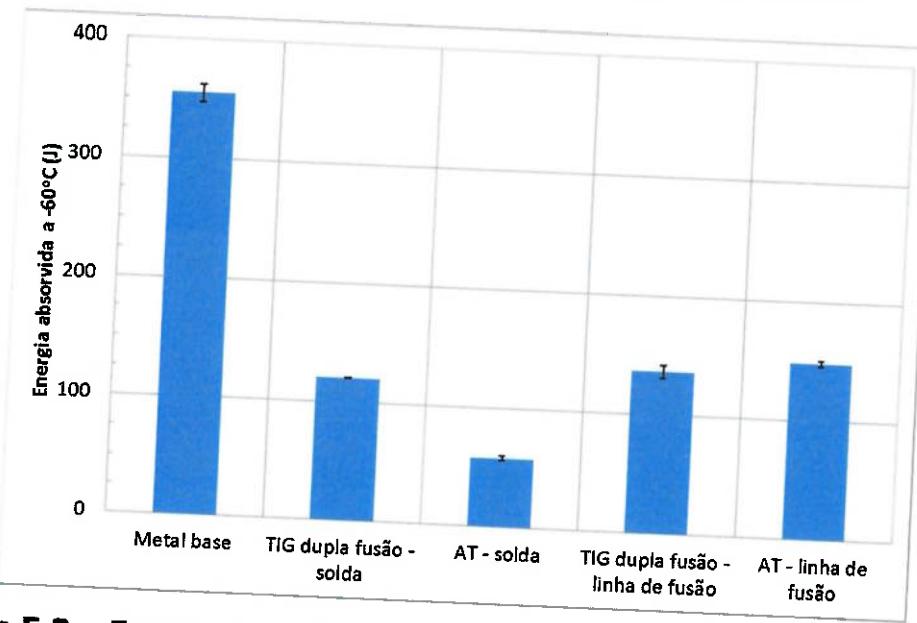
### **5.3 ENSAIO DE TENACIDADE AO IMPACTO – CHARPY.**

A tabela 5.3 apresenta os resultados obtidos no ensaio de tenacidade ao impacto – Charpy V para os corpos de prova soldados pelo processo Arame Tubular com goivagem posterior na Raiz, pelo processo TIG com Dupla Fusão e do Metal Base.

**Tabela 5.3 - Resultados dos ensaios de Charpy.**

Processo de Soldagem	Região do ensaio	CP	Resultado em Joules	Resultado Médio em Joules
Metal Base	Metal Base	CP1	368	355
		CP2	338	
		CP3	358	
TIG (Dupla Fusão)	Solda	CP1	120	120
		CP2	121	
		CP3	120	
	Linha de Fusão	CP1	133	137
		CP2	128	
		CP3	149	
Arame Tubular	Solda	CP1	60	58
		CP2	54	
		CP3	61	
	Linha de Fusão	CP1	145	148
		CP2	153	
		CP3	147	

A figura 5.2 mostra os valores médios obtidos pelo ensaio de impacto a -60°C para o metal base e para diferentes posições das juntas soldadas.



**Figura 5.2 – Energia absorvida no ensaio de impacto a -60°C Limite de resistência do metal base e das juntas soldadas.**

A diferença entre os valores observados na tabela 5.3 quando comparados os valores do metal de base, soldagem pelo processo TIG Dupla fusão e soldagem pelo processo Arame Tubular, deve-se em grande parte as microinclusões inerentes de cada processo, uma vez que o processo de soldagem por Arame Tubular com goivagem na raiz apresenta uma quantidade muito maior de micro inclusões do que a soldagem realizada pelo processo TIG.

#### **5.4 ANÁLISE DA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE FERRITA.**

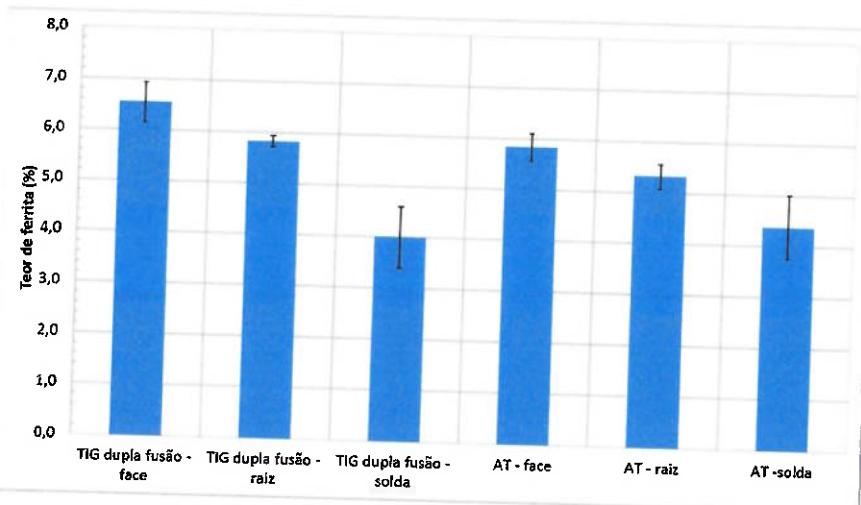
A tabela 5.4 apresenta os resultados obtidos na análise da fração volumétrica de ferrita para as regiões da face, raiz e centro da solda para os processos de Arame tubular com goivagem posterior na Raiz e para o processo TIG com Dupla Fusão. Foram realizadas 10 medições para cada região.

**Tabela 5.4 - Resultados das análises de fração Volumétrica de Ferrita.**

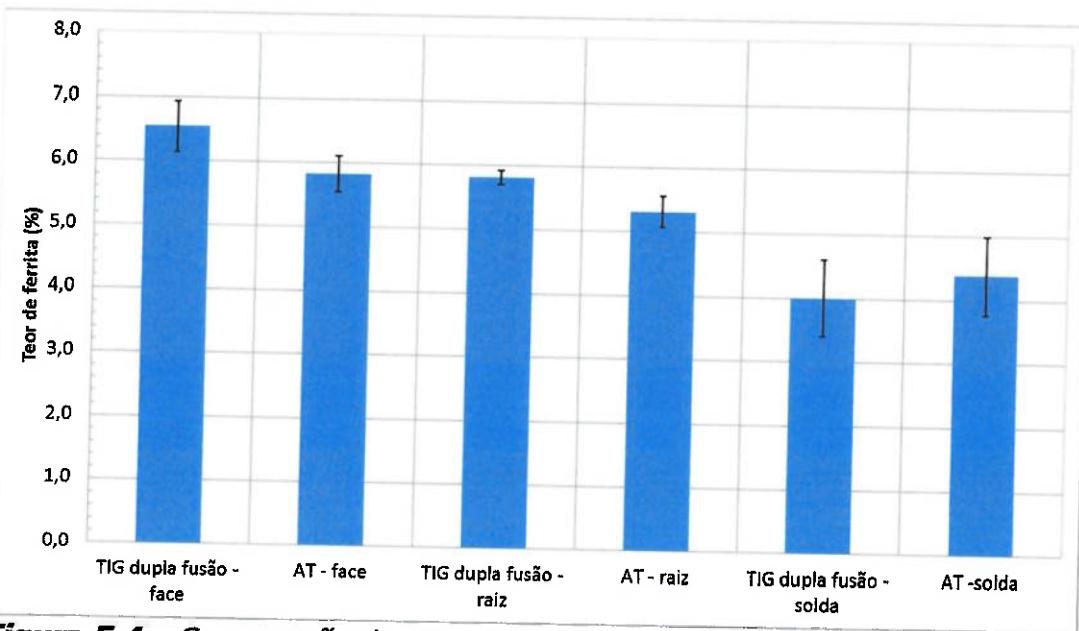
Processo de Soldagem	Região da Análise		
	FACE	RAIZ	CENTRO DA SOLDA
TIG (Dupla Fusão)	Média dos valores	6,54 Fe%	5,82 Fe%
	Desvio padrão	0,80 Fe%	0,23 Fe%
	Valor Mínimo	5,02 Fe%	5,46 Fe%
	Valor máximo	7,46 Fe%	6,13 Fe%
	Numero de medições	10	10
Arame Tubular	Média dos valores	5,83 Fe%	5,32 Fe%
	Desvio padrão	0,55 Fe%	0,49 Fe%
	Valor Mínimo	4,94 Fe%	4,61 Fe%
	Valor máximo	6,71 Fe%	5,96 Fe%
	Numero de medições	10	10

A figuras 5.3 representam graficamente a variação do teor de ferrita encontrado para os Processos TIG com dupla fusão e Arame tubular com Goivagem posterior na Raiz respectivamente.

Analizando-se a figura nota-se que existe uma redução dos teores de ferrita da face para a raiz e para o centro do cordão para ambos os processos estudados. Este resultado é devido a diferença na composição dos consumíveis e na diluição do cordão de solda.

**Figura 5.3 – Comparação do teor de ferrita entre regiões das juntas soldadas para os dois processos de soldagem.**

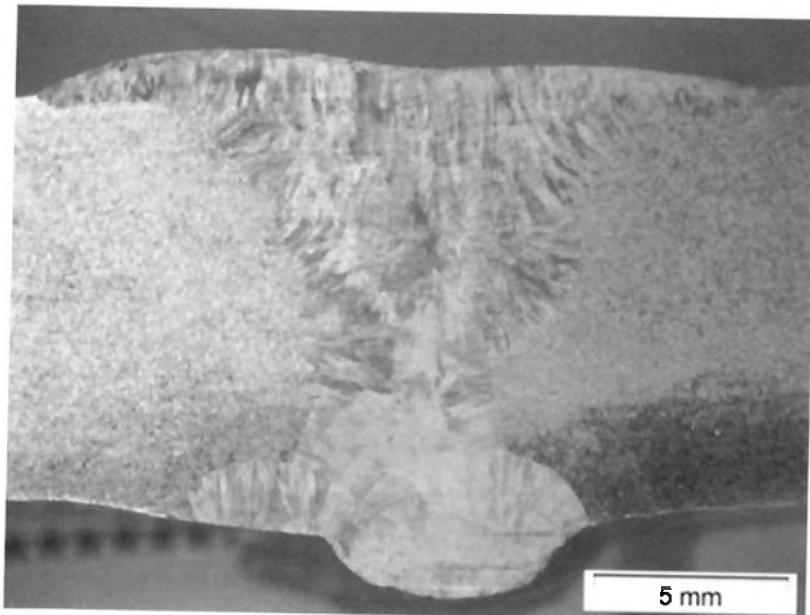
Com o intuito de comparar o teor de ferrita para as mesmas regiões com processos diferentes foi feita a figura 5.4 .



**Figura 5.4 – Comparação do teor de ferrita entre regiões iguais das juntas soldadas para os dois processos de soldagem.**

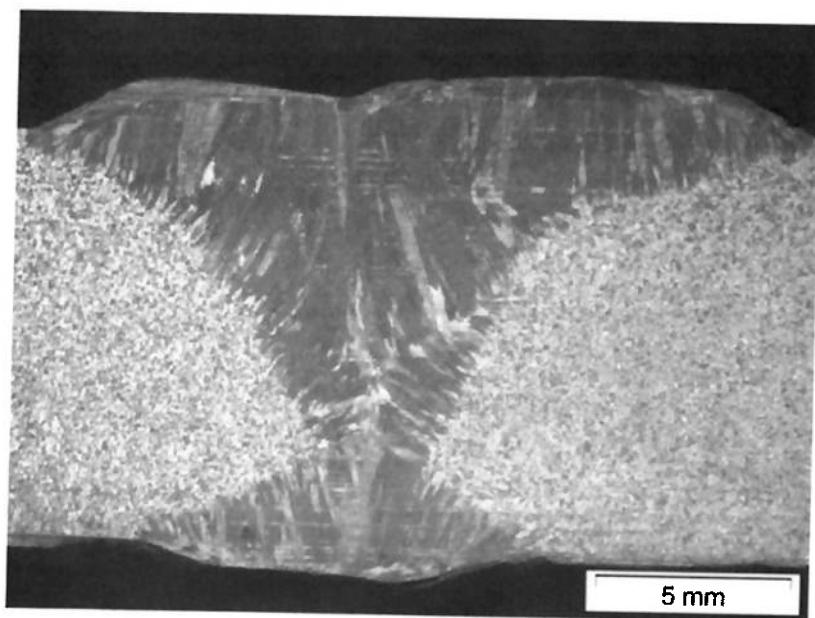
## **5.5 ANÁLISE MACROESTRUTURAL.**

Para o Processos TIG com dupla fusão a secção inspecionada (solda e zona afetada pelo calor) conforme figura 5.5 apresentou fusão completa e ausência de trincas, foram utilizados como critério de aceitação as normas ASTM E 7: 2003, ASTM E 3: 2001(2007)<sup>E1</sup>, ASTM E 340: 2006 e portanto e foram consideradas aprovadas na análise Macrográfica.



**Figura 5.5** - Macrografia do processo TIG.

Para os processos de arame tubular com goivagem posterior na Raiz a secção inspecionada (solda e zona afetada pelo calor) conforme figura 5.6 apresentou fusão completa e ausência de trincas, foram utilizadas como critério de aceitação as normas ASTM E 7: 2003, ASTM E 3: 2001(2007)E<sup>1</sup>, ASTM E 340: 2006 e portanto e foram considerados aprovados análise Macrográfica.



**Figura 5.6** - Macrografia do processo Arame tubular.

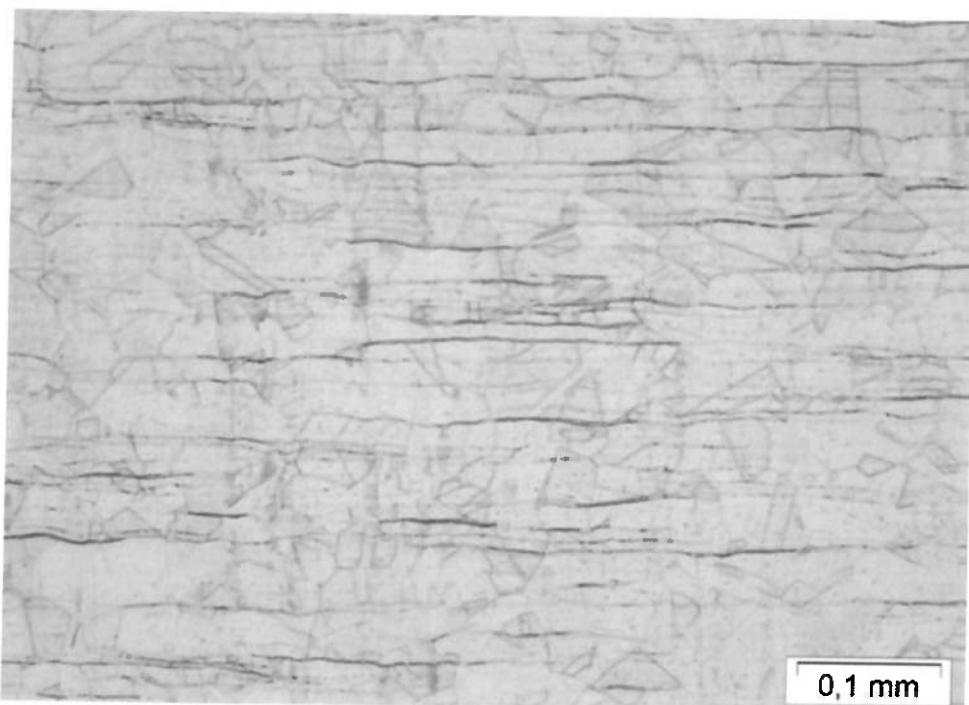
## **5.6 ANÁLISE MICROESTRUTURAL.**

### **5.6.1 MICROGRAFIAS DOS METAIS DE BASE.**

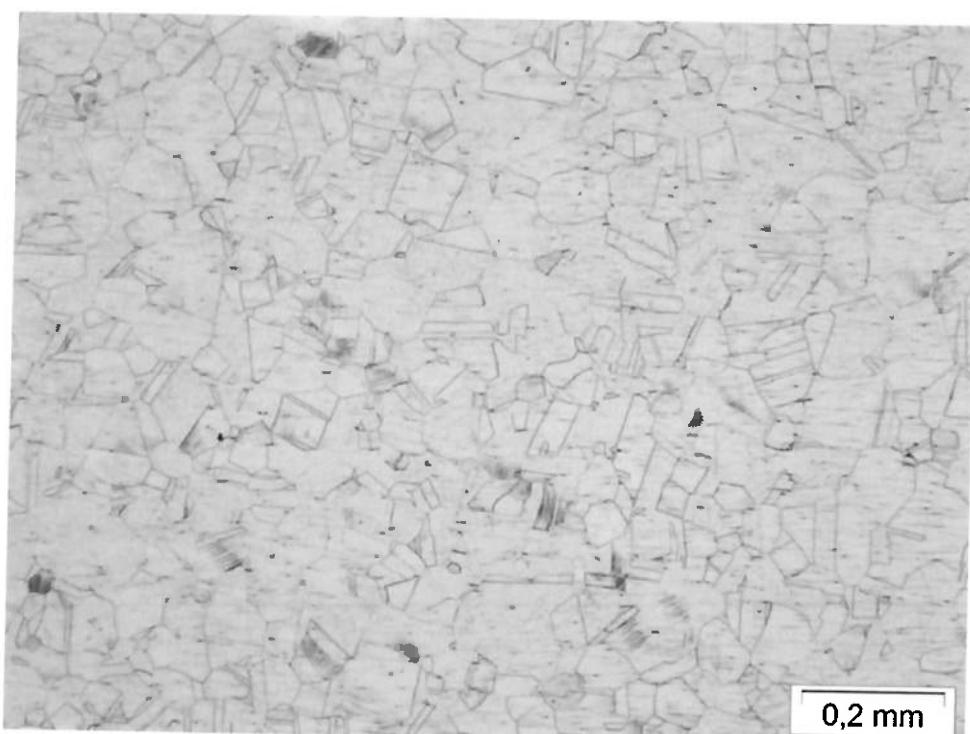
O aspecto da microestrutura do aço inoxidável A240 Tp.316 L está apresentado na figura 5.7. A micrografia realizada no sentido longitudinal do Metal de base mostra uma microestrutura típica de um aço inoxidável austenítico composta por uma matriz austenítica com presença de ferrita delta com cerca de 1%. O tamanho médio de grão Austenítico (Sentido transversal) é grão 5,0 conforme ASTM E112-2012.

A micrografia apresentada na figura 5.8 foi realizada no metal de base do corpo de prova soldado pelo processo Arame Tubular após ataque químico mostra uma microestrutura típica de um aço inoxidável austenítico composta por uma matriz austenítica com tamanho de grão 4,0 conforme ASTM E112-2012.

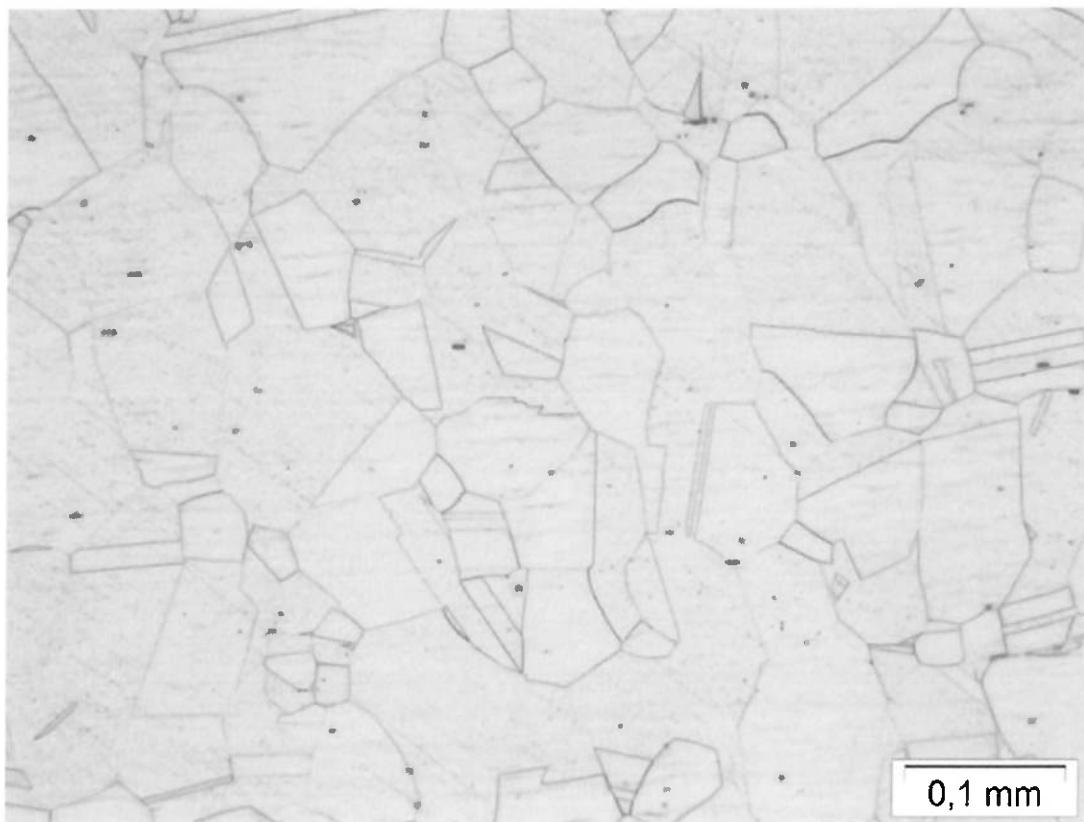
A micrografia apresentada na figura 5.9 foi realizada no metal de base do corpo de prova soldado pelo processo TIG após ataque químico mostra uma microestrutura típica de um aço inoxidável austenítico composta por uma matriz austenítica com presença de ferrita e tamanho de grão 3,5 conforme ASTM E112-2012.



**Figura 5.7** - Micrografia do Metal Base A240 Tp. 316L. Aumento 200 X.



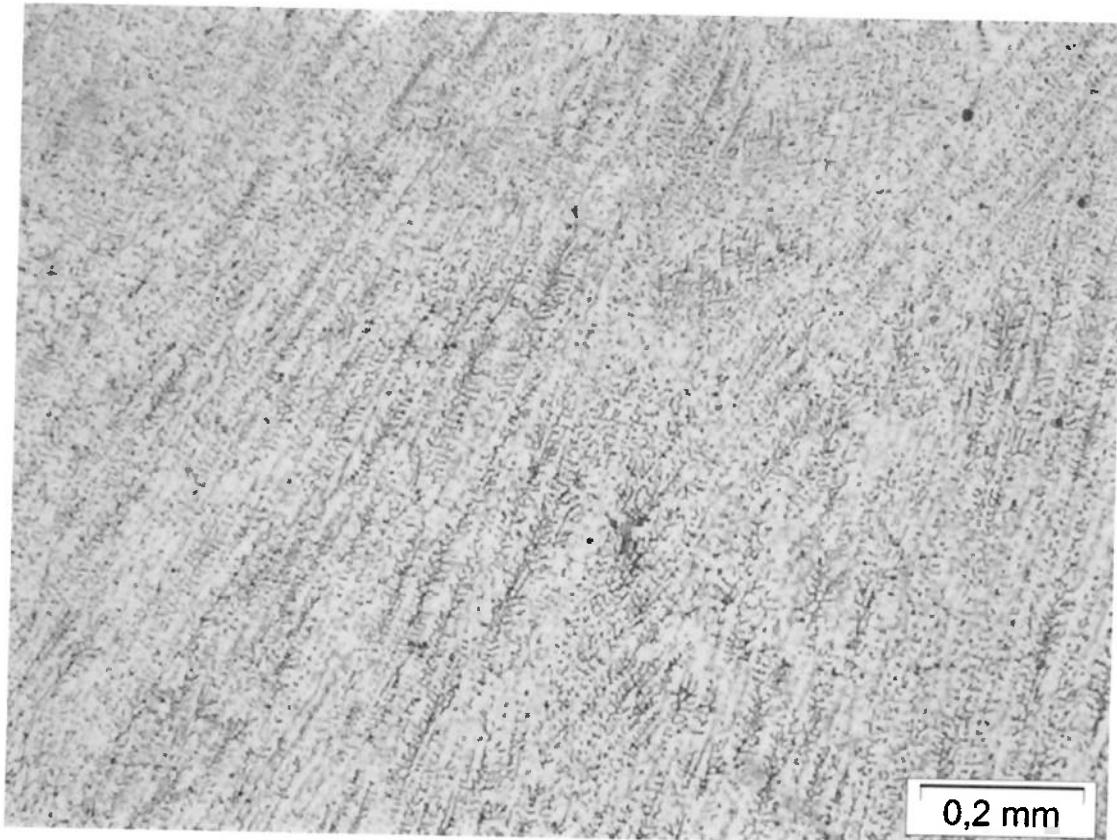
**Figura 5.8** - Micrografia realizada no metal de base do C.P soldado pelo processo Arame Tubular. Aumento de 200 X.



**Figura 5.9** - Micrografia realizada no metal de base do C.P soldado pelo processo TIG. Aumento 200 X.

## 5.6.2 MICROGRAFIAS DAS SOLDAS.

A micrografia apresentada na figura 5.10 foi realizada na solda do corpo de prova soldado pelo processo Arame Tubular após ataque químico e mostra uma microestrutura típica de um aço inoxidável austenítico fundido com presença de ferrita.



**Figura 5.10** - Micrografia realizada na Solda obtida pelo processo Arame Tubular. Aumento de 200 X.

A micrografia apresentada na figura 5.11 foi realizada na solda do corpo de prova soldado pelo processo TIG após ataque químico e mostra uma microestrutura típica de um aço inoxidável austenítico fundido com presença de ferrita.



**Figura 5.11** - Micrografia realizada na Solda obtida pelo processo TIG.

Aumento de 200 X.

### **5.6.3 MICROGRAFIAS DAS ZONAS AFETADAS PELO CALOR (ZAC).**

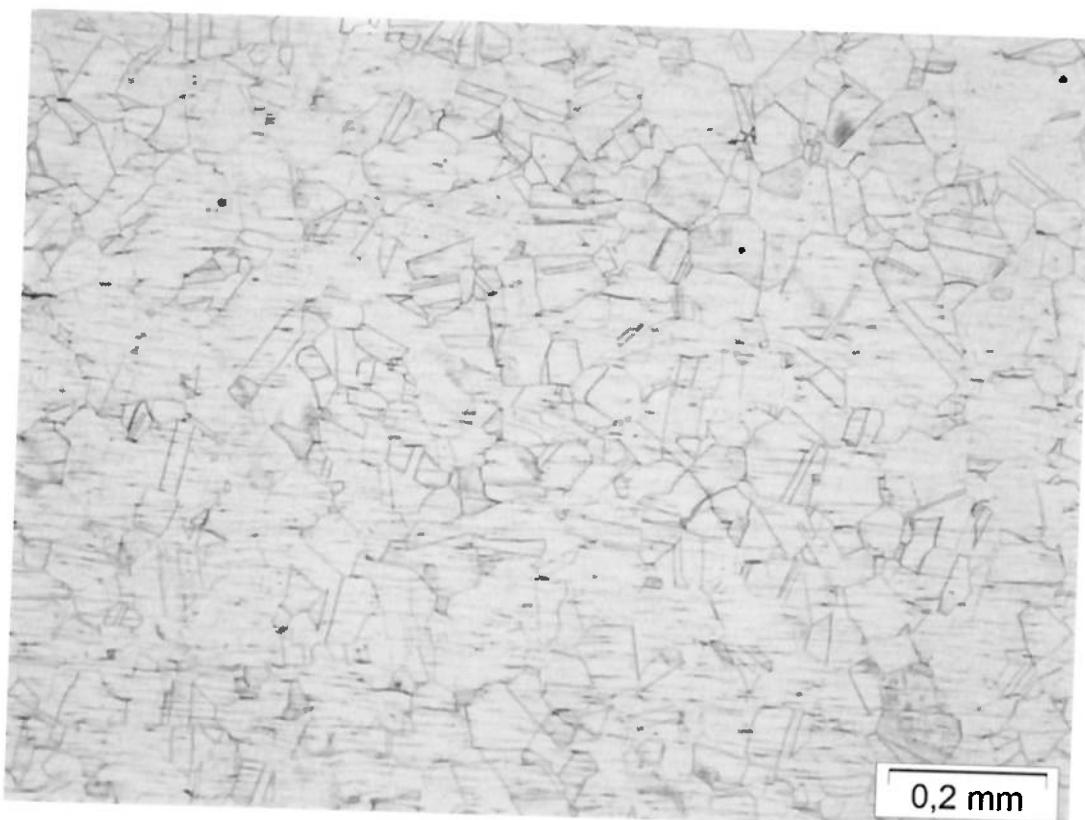
A micrografia apresentada na figura 5.12 foi realizada na (ZAC 1) do corpo de prova soldado pelo processo Arame Tubular após ataque químico mostra uma microestrutura típica de um aço inoxidável austenítico composta por uma matriz austenítica com tamanho de grão 3,5 conforme ASTM E112-2012.

A micrografia apresentada na figura 5.13 foi realizada na (ZAC 2) do corpo de prova soldado pelo processo Arame Tubular após ataque químico mostra uma microestrutura típica de um aço inoxidável austenítico composta

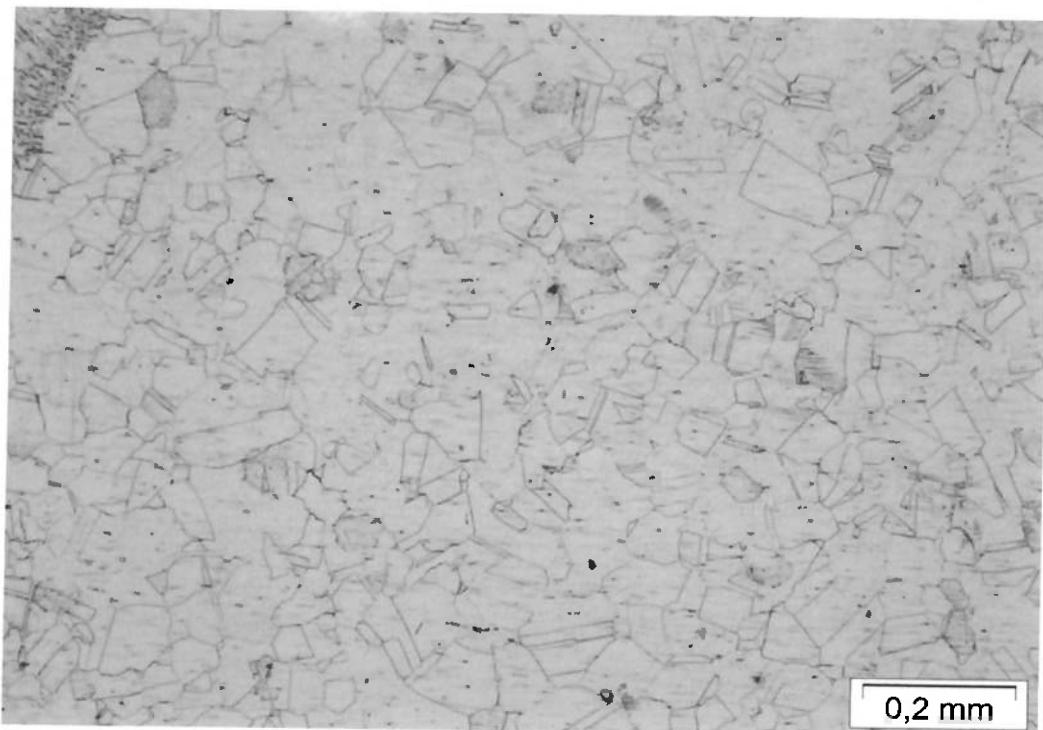
por uma matriz austenítica com tamanho de grão 3,5 conforme ASTM E112-2012.

A micrografia apresentada na figura 5.14 foi realizada na (ZAC 1) do corpo de prova soldado pelo processo TIG após ataque químico mostra uma microestrutura típica de um aço inoxidável austenítico composta por uma matriz austenítica com presença de ferrita e tamanho de grão 3,0 conforme ASTM E112-2012.

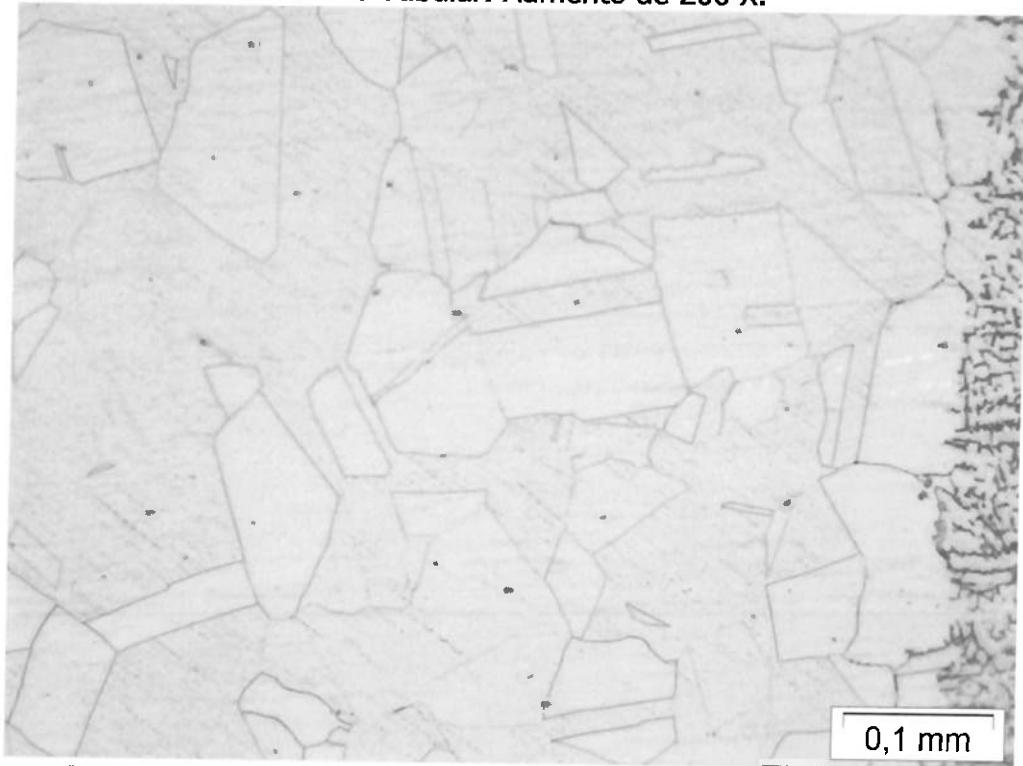
A micrografia apresentada na figura 5.15 foi realizada na (ZAC 2) do corpo de prova soldado pelo processo TIG após ataque químico mostra uma microestrutura típica de um aço inoxidável austenítico composta por uma matriz austenítica com presença de ferrita e tamanho de grão 4,0 conforme ASTM E112-2012.



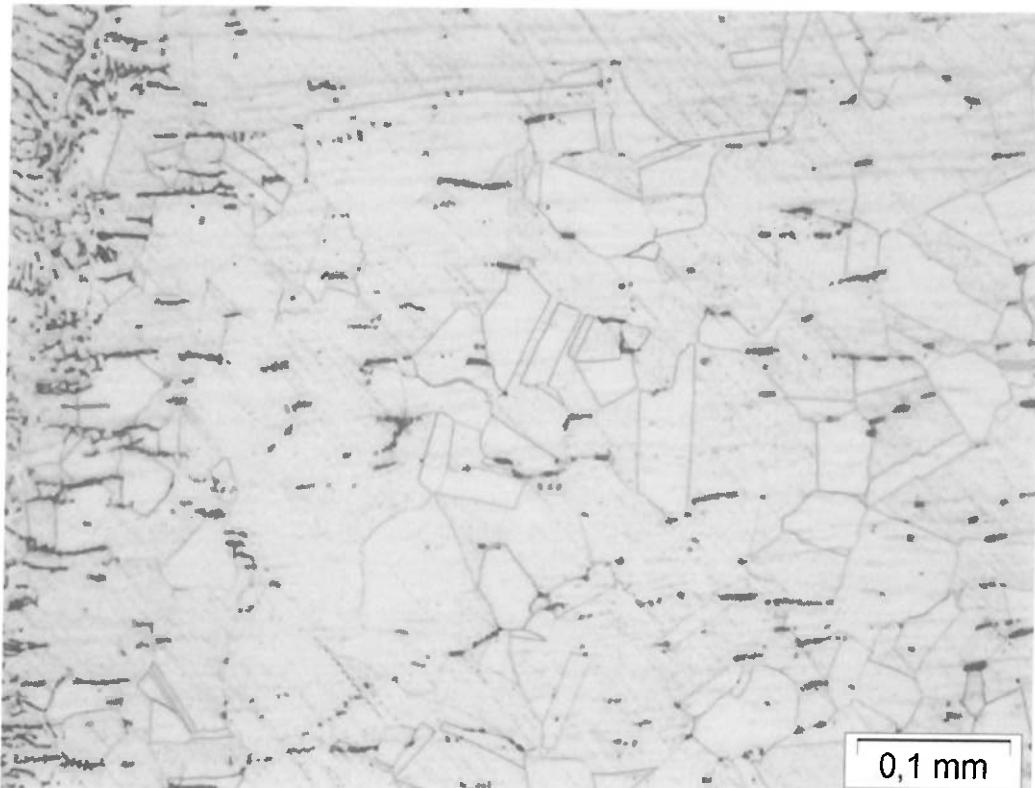
**Figura 5.12** - Micrografia realizada na ZAC 1 da soldagem obtida pelo processo Arame Tubular. Aumento de 200 X.



**Figura 5.13** - Micrografia realizada na ZAC 2 da soldagem obtida pelo processo Arame Tubular. Aumento de 200 X.



**Figura 5.14** - Micrografia realizada na ZAC 1 da soldagem obtida pelo processo TIG. Aumento de 200 X.

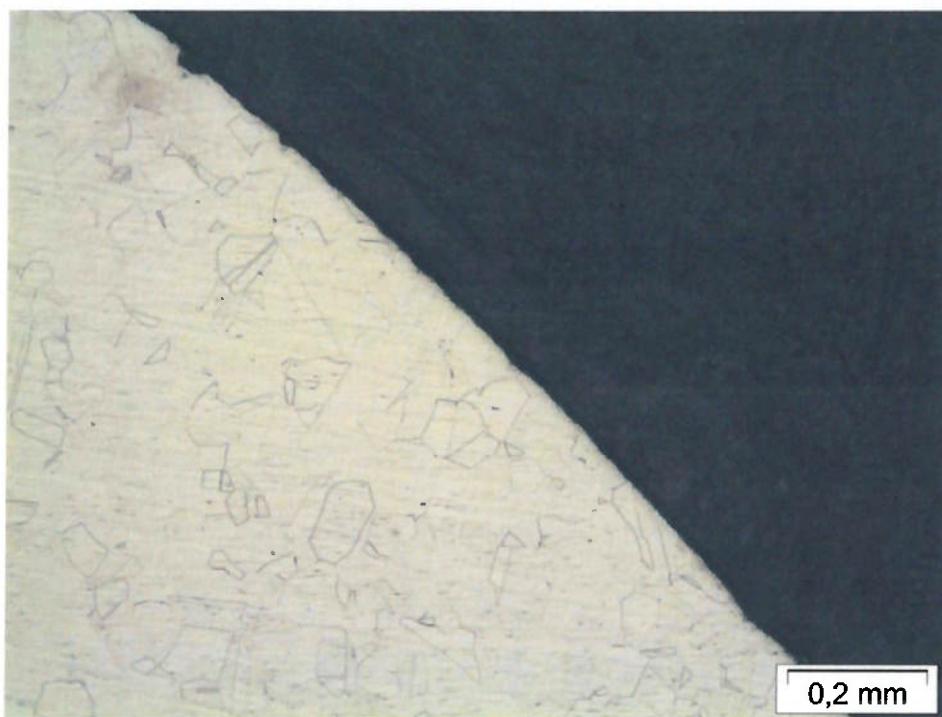


**Figura 5.15** - Micrografia realizada na ZAC 2 da soldagem obtida pelo processo TIG. Aumento de 200 X.

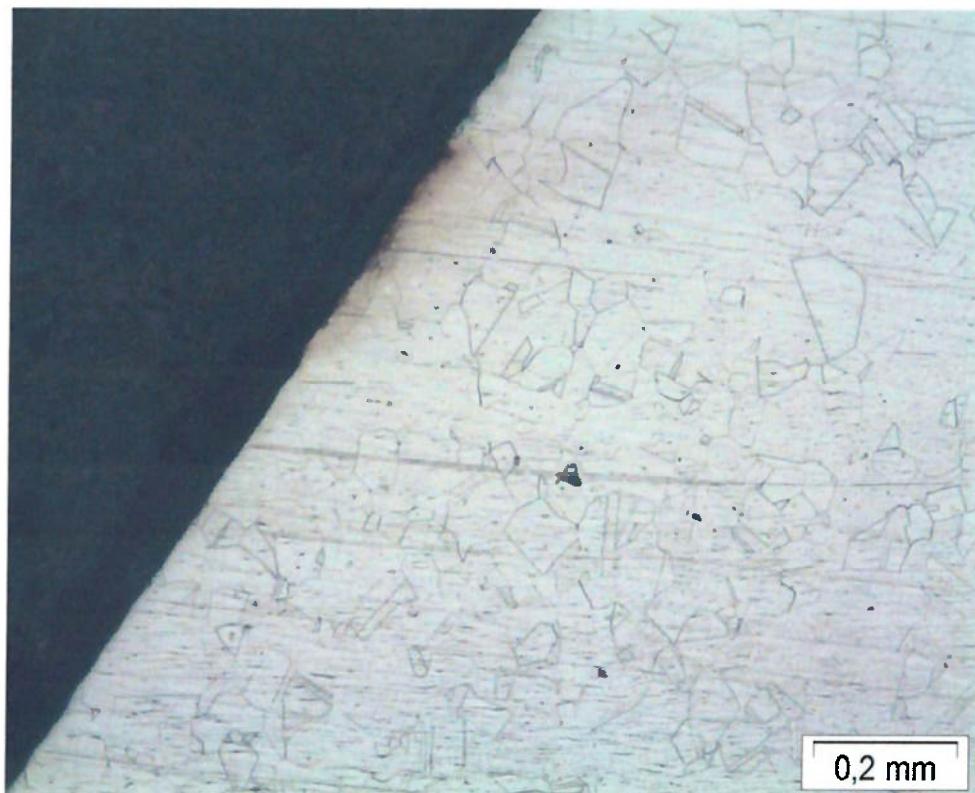
#### **5.6.4 MICROGRAFIAS DOS CORPOS DE PROVA DE GOIVAGEM.**

##### *5.6.4.1 MICROGRAFIAS DOS CORPOS DE PROVA DE GOIVAGEM A AR COM ELETRODO DE CARVÃO COM LIMPEZA POSTERIOR.*

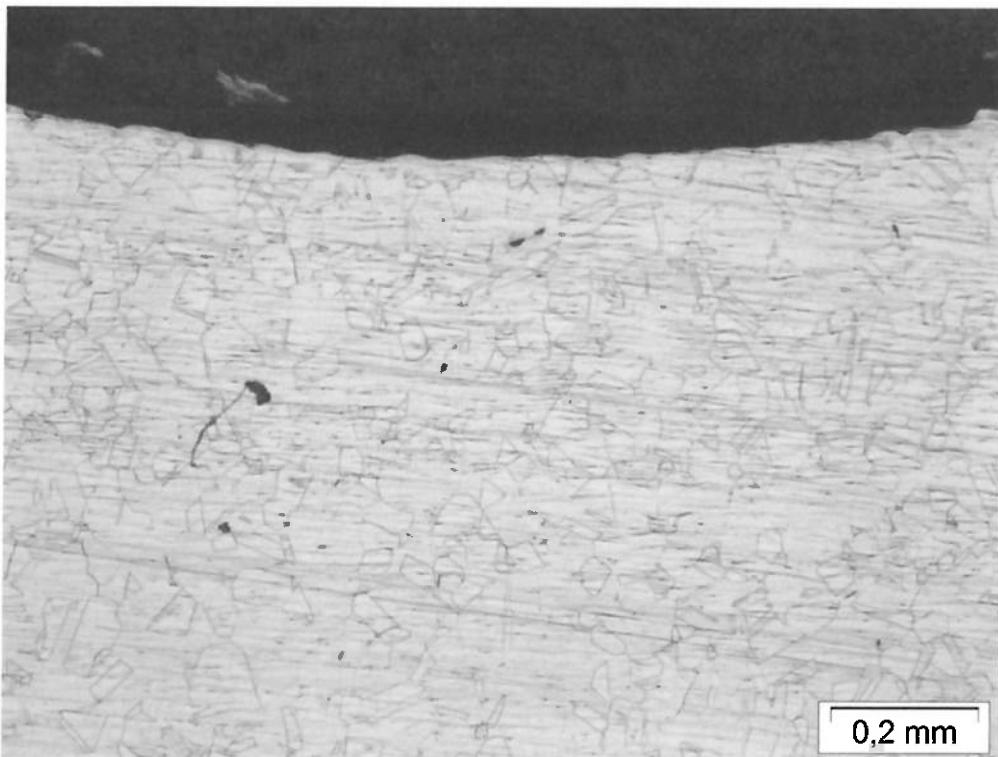
As Micrografias apresentada nas figuras 5.16, 5.17 e 5.18 realizadas após goivagem do metal base com limpeza posterior, não evidenciou a presença de precipitados e ou carbonetos, ou indícios de contaminação devido ao processo utilizado para limpeza da goivagem.



**Figura 5.16** - Micrografia realizada do lado esquerdo do corpo de prova de goivagem a ar com eletrodo de Grafite. Aumento de 200 X.



**Figura 5.17** - Micrografia realizada do lado direito do corpo de prova de goivagem a ar com eletrodo de Grafite. Aumento 200 X.

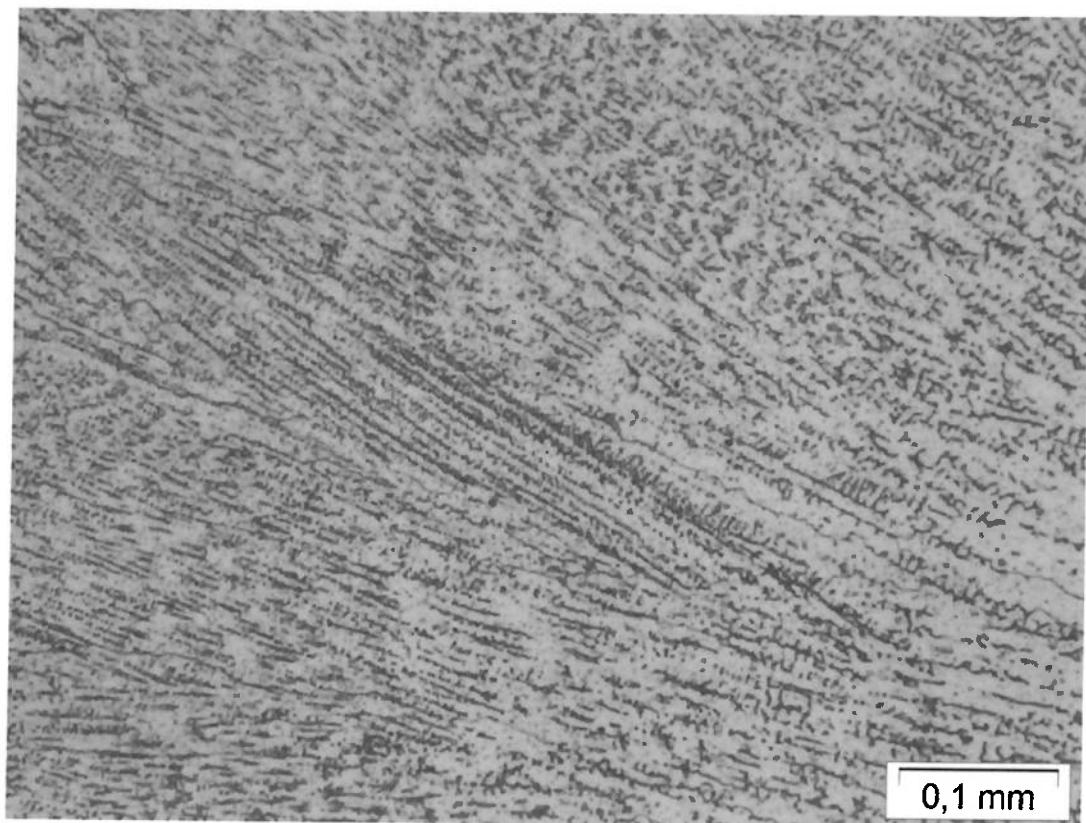


**Figura 5.18** - Micrografia realizada na região do fundo do sulco goivado do corpo de prova de goivagem a ar com eletrodo de Grafite. Aumento 200 X.

## **5.7 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO – ASTM A262 (PRÁTICA A).**

### **5.7.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO PARA O CORPO DE PROVA SOLDADO PELO PROCESSO ARAME TUBULAR.**

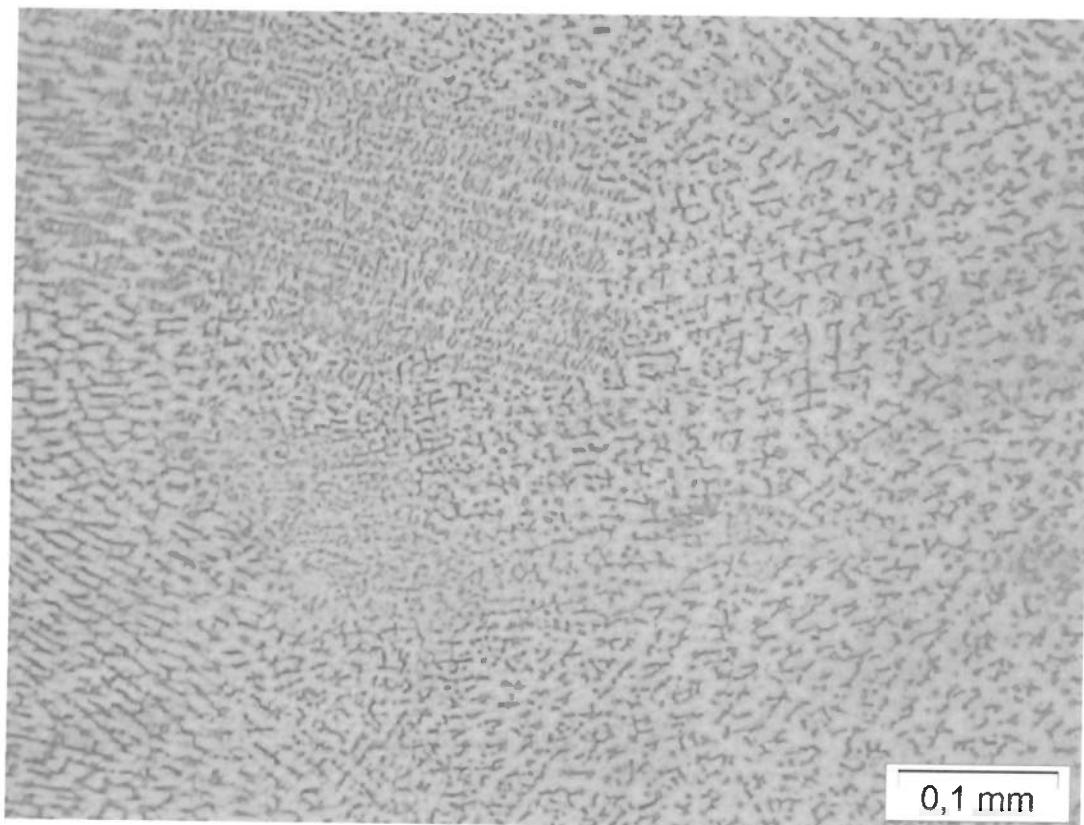
A micrografia apresentada na figura 5.19 foi realizada após ataque de corrosão intergranular e mostra uma microestrutura típica de um aço inoxidável austenítico fundido, composta por uma matriz austenítica com presença de ferrita isolada (figura 4, ASTM A 262), portanto o material atende a norma ASTM A 262-13 – Prática A.



**Figura 5.19** - Micrografia realizada para ensaio de corrosão no Corpo de prova soldado pelo processo Arame Tubular. Aumento 200 X.

### **5.7.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO PARA O CORPO DE PROVA SOLDADO PELO PROCESSO TIG.**

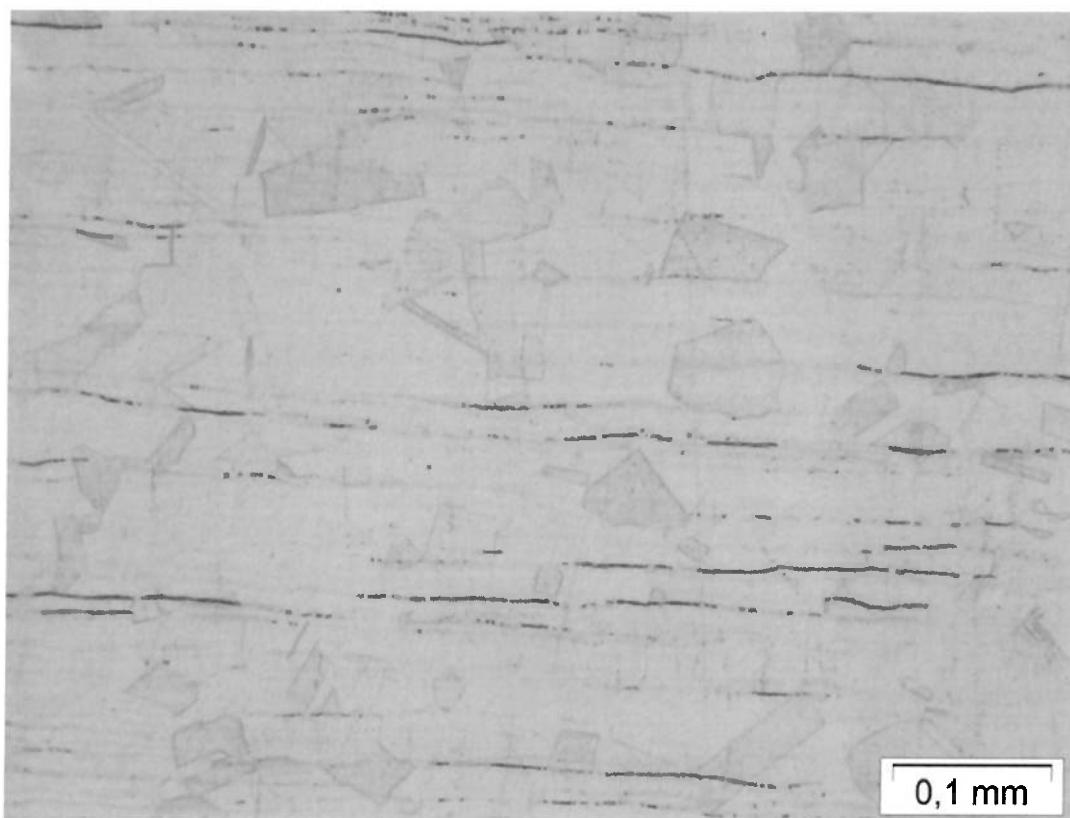
A micrografia apresentada na figura 5.20 realizada após ataque de corrosão intergranular mostra uma microestrutura típica de um aço inoxidável austenítico fundido, composta por uma matriz austenítica com presença de ferrita isolada (figura 4, ASTM A 262) portanto o material atende a norma ASTM A 262-13 – Prática A.



**Figura 5.20** - Micrografia realizada para ensaio de corrosão no Corpo de prova soldado pelo processo TIG. Aumento 200 X.

### **5.7.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO PARA O CORPO DE PROVA DE GOIVAGEM A AR COM ELETRODO DE GRAFITE COM LIMPEZA POSTERIOR.**

A micrografia apresentada na figura 5.21 realizada após tratamento térmico de sensitização e ataque de corrosão intergranular, mostra uma microestrutura austenítica em degrau (figura 1, ASTM A 262), portanto o material atende a norma ASTM A262–10 - Prática A.

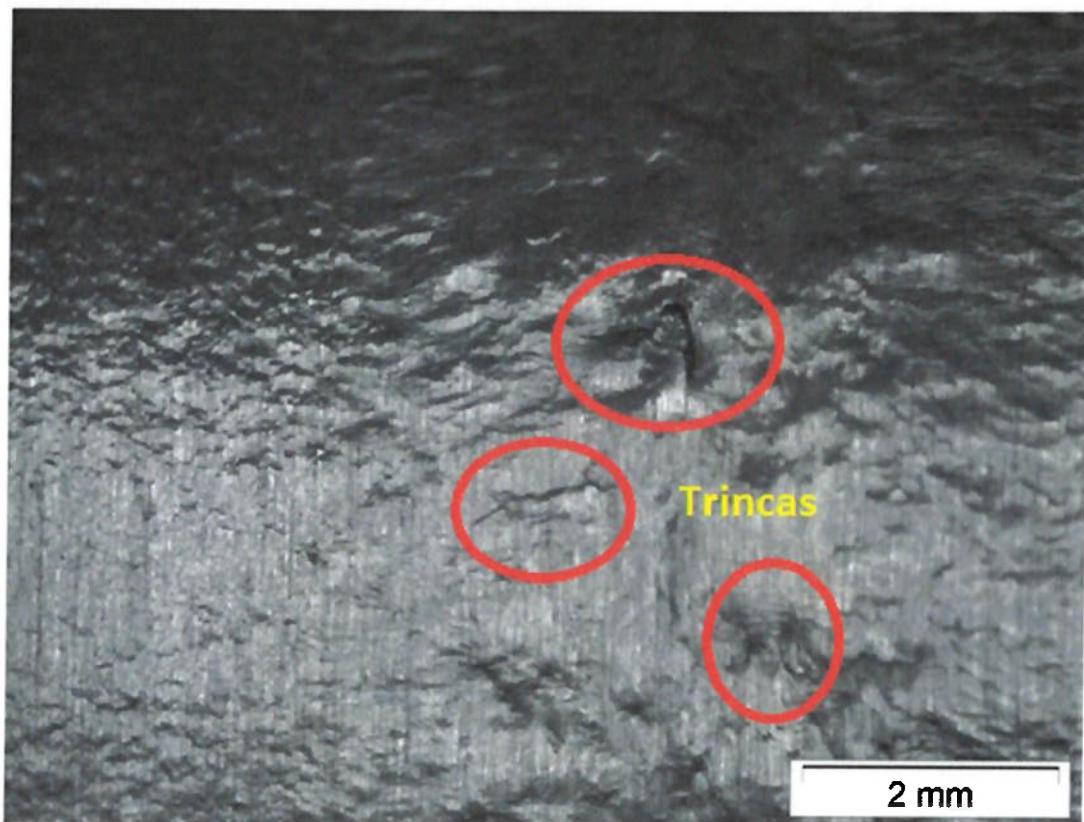


**Figura 5.21** - Micrografia realizada para ensaio de corrosão no Corpo de prova de goivagem a ar com eletrodo de grafite e limpeza posterior. Aumento 200 X.

## **5.8 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO – ASTM A262 (PRÁTICA E).**

### **5.8.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO PARA O CORPO DE PROVA SOLDADO PELO PROCESSO ARAME TUBULAR.**

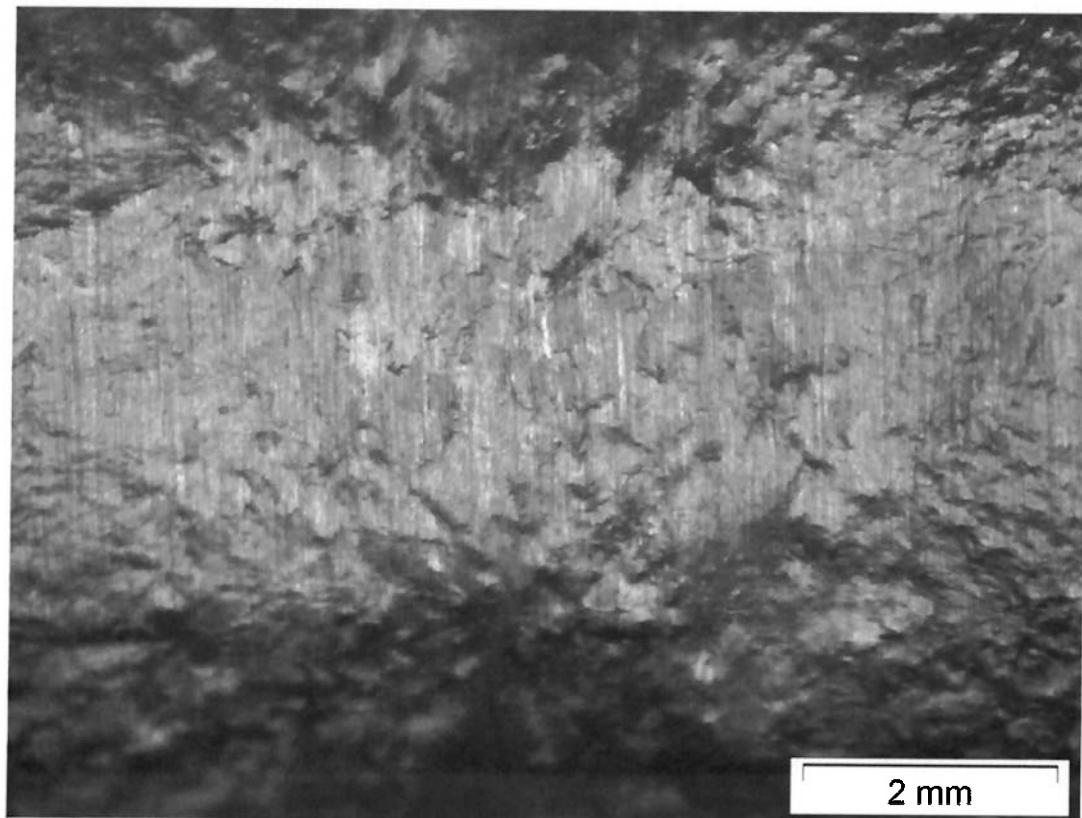
Após observar o Aspecto visual junto à superfície do corpo-de-prova, após tratamento térmico de sensitização e ataque químico e o dobramento a 180°. Foi evidenciada a presença de trincas intergranulares através de um microscópio estereoscópico conforme demonstrado na figura 5.22, por este motivo o material não atende a norma ASTM A 262-13 – Prática E.



**Figura 5.22** – Aspecto visual do ensaio de corrosão Pratica E do corpo de prova soldado pelo processo Arame Tubular. Aumento 20 X.

#### **5.8.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO PARA O CORPO DE PROVA SOLDADO PELO PROCESSO TIG.**

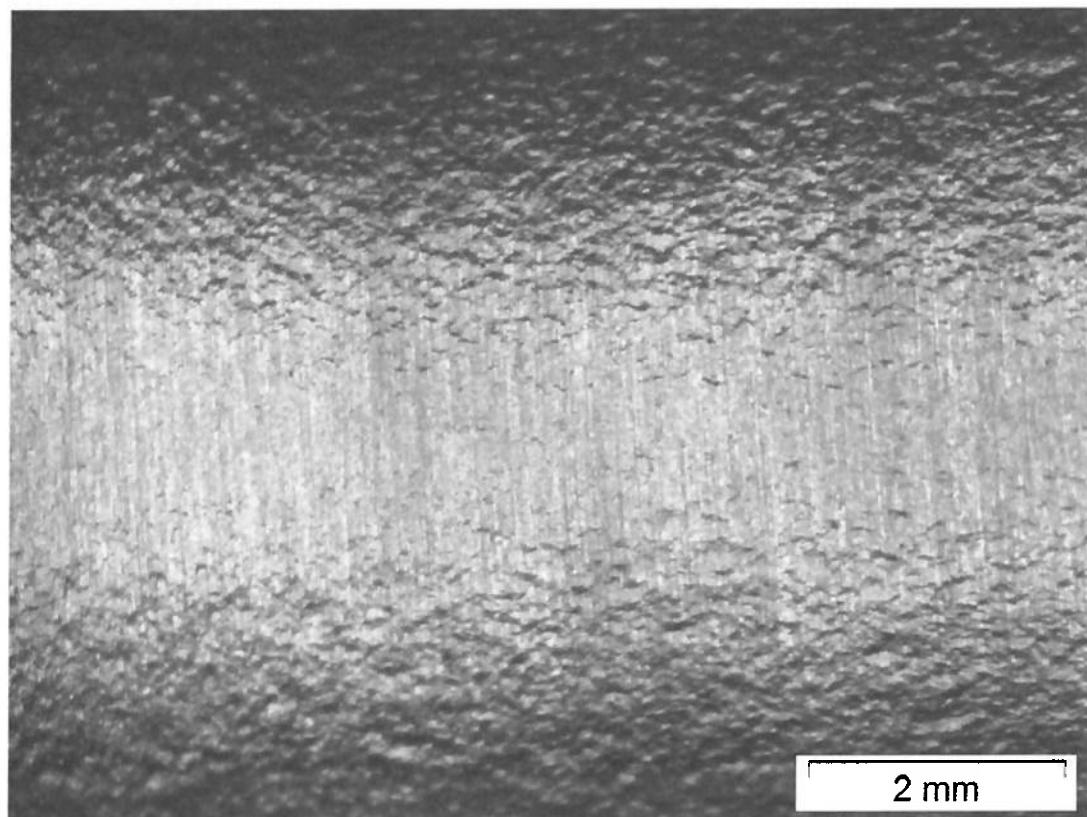
Após observar o Aspecto visual junto à superfície do corpo-de-prova, após tratamento térmico de sensitização e ataque químico e o dobramento a 180°. Não foram evidenciados a presença de trincas intergranulares, a visualização foi realizada através de um microscópio estereoscópico conforme demonstrado na figura 5.23, por este motivo o material atende a norma ASTM A 262-13 – Prática E.



**Figura 5.23** – Aspecto visual do ensaio de corrosão Pratica E do corpo de prova soldado pelo processo TIG. Aumento 20 X.

### **5.8.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO PARA O CORPO DE PROVA DE GOIVAGEM A AR COM ELETRODO DE GRAFITE COM LIMPEZA POSTERIOR.**

Após observar o Aspecto visual junto à superfície do corpo-de-prova, após tratamento térmico de sensitização e ataque químico e o dobramento a 180°. Não foi evidenciado a presença de fissuras intergranulares, a visualização foi realizada através de um microscópio estereoscópico conforme demonstrado na figura 5.24, por este motivo o material atende a norma ASTM A 262-13 – Prática E.



**Figura 5.24-** Aspecto visual do ensaio de corrosão pratica E do corpo de prova de goivagem ar com eletrodo de Grafite com limpeza posterior. Aumento 20 x.

## **6. CONCLUSÕES.**

Com base nos materiais, equipamentos e técnicas experimentais empregadas, pode-se concluir que:

1. Os ensaios macrográficos realizados para os dois processos de soldagem (TIG com dupla fusão e Arame Tubular com goivagem posterior na raiz) foram considerados aprovados pois apresentaram fusão completa e isenta de trincas, utilizando critério de aceitação das normas ASTM E7 , ASTM E3 e ASTM E 340.
2. Com relação a resistência a tração ambos os processos apresentados tiveram os resultados aprovados nos ensaios de tração realizados conforme a norma ASME IX.
3. Para o ensaio de dobramento ambos os processos apresentados tiveram os resultados aprovados e isentos de descontinuidade conforme critério de aceitação da norma ASME IX.
4. Nos resultados do ensaio de tenacidade ao impacto – Charpy V, o processo TIG apresentou uma maior Tenacidade em relação ao processo de Soldagem por Arame tubular, pois apresentou o dobro de resistência ao impacto na solda.
5. Nos ensaios micrográficos, foi constatado que a soldagem realizada pelo processo de soldagem por Arame Tubular promoveu um aumento no tamanho de grão de cerca de 14% quando comparado com o processo TIG, o que favorece a redução da resistência a tenacidade do metal de solda junto com a presença de microinclusões de escória, conforme demonstrado nos ensaios de Charpy.

6. Para o ensaio de Resistência à corrosão intergranular, ambos processos de soldagem foram considerados aprovados conforme ASTM 262 Prática A.
7. Já para o ensaio de corrosão da ASTM A262 Prática E, o processo de soldagem TIG com dupla fusão na raiz foi considerado aprovado, enquanto o processo de soldagem por Arame Tubular com goivagem na raiz foi reprovado por apresentar a presença de microtrincas intergranulares evidenciadas através de microscópio.
8. Comparando-se os resultados obtidos da soldagem de aços inoxidáveis AISI 316L utilizando o processo TIG com dupla fusão e o processo de soldagem por Arame Tubular com goivagem na raiz, conclui-se que o processo TIG apresenta uma qualidade superior além de um excelente acabamento.

**7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.**

1. Analisar qual método de goivagem é o mais importante e mais viável do ponto de vista da qualidade e dos custos envolvidos.
2. Estudar a parte de custos, demonstrando qual dos processos apresentados é mais viável economicamente.
3. Estudar a deformação para os diferentes processos apresentados, variando a geometria dos chanfros.
4. Analisar do ponto de vista da qualidade e da integridade da junta soldada, qual dos processos de goivagem da raiz para o processo Arame Tubular é o melhor.

## **8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.**

- [1] Soldagem I Introdução aos Processos de Soldagem. Produzido por Prof. Paulo J. Modenesi Prof. Paulo Villani Marques na UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS Departamento de Engenharia Metalúrgica, Belo Horizonte, novembro de 2000. Disponivel em:<[www.ebah.com.br/content/ABAAAAG-0AC/soldagem](http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAG-0AC/soldagem)> Acessado em: Fev/2014.
- [2] - Wainer, E.; Brandi, Sérgio D.; Mello, Fábio D. Homem – Soldagem Processos e Metalurgia, Ed. Edgard Blücher LTDA, 1992.
- [3].Desenho e Tecnologia Mecânica. Produzido por Antonio Cappelletti Ferreira e Willian Sales de Carvalho da Universidade Federal de São Carlos. Disponivel em:< [www.ebah.com.br/content/ABAAAenfYAB/soldagem-fundicao-corte](http://www.ebah.com.br/content/ABAAAenfYAB/soldagem-fundicao-corte)> Acessado em: Fev/2014.
- [4] - Marques, Paulo V., Modenesi, Paulo J., Bracarense, Alexandre Q. Soldagem, fundamentos e tecnologia, 3a edição Atualizada, Belo Horizonte, Editora UFMG 2011.
- [5] - BRACARENSE, Alexandre Q. PROCESSO DE SOLDAGEM TIG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2000.
- [6] - Modenesi, P. J. - Soldabilidade de algumas ligas metálicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2011.
- [7]. Arames tubulares. Produzido por: Cleber Fortes – Engenheiro Metalúrgico, M.Sc da Assistência Técnica Consumíveis – ESAB BR. Disponivel em:< [http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/apostilas/upload/1901098rev0\\_ApostaAraresTubulares.pdf](http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/apostilas/upload/1901098rev0_ApostaAraresTubulares.pdf)> Acessado em: Fev/2014.
- [8] - OKUMURA, T., TANIGUCHI, C. – Engenharia de Soldagem e Aplicações –

[9] - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. A 453/A453M; Standard specification for high-temperature bolting materials, with expansion coefficients comparable to austenitic stainless steels. United West Conshohocken, 1999. 6p.

[10] - ASM INTERNATIONAL. Metals Handbook: Volume 11: Failure Analysis and Prevention. United States of America, 2002. 2909p.

[11] - ASM INTERNATIONAL. Metals Handbook: Volume 6: Welding, Brazing and Soldering. United States of America, 1993. 2873p.

[12] - Bauly, J. C. - Caracterização microestrutural e propriedades de juntas dissimilares entre aços inoxidáveis fabricadas por processos de fusão. 2000. 147p. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Reatores Nucleares de potência e Tecnologia do Combustível Nuclear) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2000.

[13] - Coe, F. R. - Welding steels without hydrogen cracking; The welding institute, London , 1973.

[14] - Freire Júnior, R. C. S. - Influência dos parâmetros de soldagem na formação de trincas à frio em juntas soldadas de ARBL. 1998. 70p. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, 1998.

[15] - Godoy, A. F. - Estudo da suscetibilidade à trinca à frio em juntas soldadas de aço SAR - 80 BT. 1989. 97p. Tese (Mestrado em Engenharia de Fabricação) - Faculdade de Engenharia de Campinas, Campinas, 1989.

- [16] - INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION. ISO 17642-2:2005: Destructive test on welds in metallic materials - cold cracking tests for weldments - arc welding processes - Part2: Self-restraint tests. Switzerland, 2005. 28p.
- [17] - Olea, C. A. W. - Caracterização por microscopia eletrônico do aço SAE1141 microligado. 2002. 106p. Dissertação (Mestrado em Engenharia - Área de concentração: Ciência dos Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2002.
- [18] - Ramos, J. E. - Caracterização da estabilidade de aços inoxidáveis austeníticos sem adição de níquel. 2009. 61p. Dissertação (Mestrado em Engenharia - Área de concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2009.
- [19] - USIMINAS. Chapas grossas: catálogo. Minas Gerais: Belo Horizonte, Setembro de 2012
- [20] - Yang, J. R. and Bhadeshia, H. K. D. H. - Thermodynamics of the acicular ferrite transformation in alloy-steel weld deposits, Proc. Conf. "Advances in Welding Science and Technology", ASM. Daid, S. A. (Ed.), pp. 187-191, 1986.
- [21] - Marques, P. Villani. Terminologia da soldagem, 3a edição Atualizada, Belo Horizonte, Editora "O lutador".
- [22] - Colpaert, H. e Costa e Silva, A. L, Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. Ed. Blucher, 4º Edição, 2012.
- [23] - ASME Boiler and Pressure Vessel Code: ASME IX Welding, Brazing, and Fusing Qualifications 2013.

*SLD-Monografia 04 / 2014 – T4*

[24] – STANDARD Guide For Preparation of Metallographic Specimens: E3,

American Society For Testing and Materials 2011.

[25] – STANDARD Terminology Relating to Metallography: E7, American Society  
For Testing and Materials 2009.

[26] – STANDARD Test Methods For Notched Bar Impact Testing of Metallic  
Materials: E23, American Society For Testing and Materials 2012.

[27] – STANDARD Test Methods For Determining Average Grain Size: E112,  
American Society For Testing and Materials 2013.

[28] – STANDARD Test Methods For Macroetching Metals and Alloys: E340,  
American Society For Testing and Materials 2013.