

Fábio Veloso Czernorucki

**COMPARAÇÃO ENTRE OS PROCESSOS DE
SOLDAGEM TIG E ARAME TUBULAR COM
DUPLA FUSÃO NO PASSE DE RAIZ**

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

São Paulo

03/2014

Fábio Veloso Czernorucki

(Engenheiro Mecânico, Universidade Mackenzie, 2000)

**COMPARAÇÃO ENTRE OS PROCESSOS DE
SOLDAGEM TIG E ARAME TUBULAR COM
DUPLA FUSÃO NO PASSE DE RAIZ**

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: ME. Jaime Casanova Soeiro Junior
Co-Orientador: Prof. Dr. Sérgio Duarte Brandi

São Paulo

03/2014

Confia no Senhor de todo o teu coração e não te estribes no teu próprio entendimento. Reconhece-o em todos os teus caminhos e Ele endireitará as tuas veredas.

(Provérbios 3:5 e 6 - Bíblia de Estudo Genebra)

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho a minha esposa Renata
e toda a minha família.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Myron Czernorucki e Lúcia Veloso Czernorucki pela educação e apoio em todos os momentos da minha vida.

A minha esposa Renata C. K. Czernorucki pela paciência e incentivo durante o trabalho e no curso.

Aos professores Sergio Brandi e Jaime Casanova pela orientação e conselhos que tornaram viável o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Walmir Person, gerente na ABB Ltda, pelo apoio e incentivo na busca de melhorias no processo de soldagem dos tanques de transformadores.

CURRICULUM VITAE

Formação:

Engenheiro Mecânico.

Pós Graduado em Qualidade e Produtividade.

Experiência:

Engenheiro da Qualidade – ABB Ltda.

Gerente da Qualidade – CSJ Metalúrgica SA.

Gerente da Qualidade – Dresser-Rand do Brasil.

RESUMO

Com a alta competitividade das indústrias brasileiras, a concorrência com o mercado externo e a crescente demanda por produtos de maior qualidade e menor custo, tornou-se uma constante a necessidade de redução nos custos e melhoria nas técnicas aplicadas na fabricação. Neste trabalho foram realizados ensaios comparando o processo TIG utilizando a técnica da dupla fusão, que atualmente é utilizado na fabricação dos tanques de transformadores, e o Arame tubular com proteção gasosa, também com a técnica da dupla fusão. O metal base utilizado foi o ASTM A36 com 16 milímetros de espessura e os consumíveis de soldagem utilizados foram, ER 70S3 para o processo TIG e E71T-1 para o processo arame tubular. Com os resultados obtidos, concluiu-se que é possível utilizar o processo arame tubular para realizar soldas de dupla fusão na raiz, com penetração total, verificando a ausência de defeitos no ensaio de ultra-som e análise macrográfica. Como a soldagem por dupla fusão com o arame tubular na raiz não é uma técnica comum no mercado, se faz necessário treinamento adequado aos soldadores e ajustes dos parâmetros de soldagem. O tempo de soldagem obtido no arame tubular foi aproximadamente 5 vezes menor comparado ao processo TIG e o custo total da soldagem calculado foi aproximadamente 3 vezes menor no arame tubular comparado com o processo TIG.

ABSTRACT

With the high competitiveness of Brazilian industries, the competition with foreign markets and the increasing demand for products with higher quality and lower cost, has become a constant need to reduce costs and improve the techniques used in manufacturing. In this study tests were performed comparing the TIG process using the technique of double fusion, which is currently used in the manufacture of transformer tanks, and flux cored arc welding process with shielding gas, also with dual fusion technique . The base metal used was ASTM A36 with 16 millimeters thickness and the welding consumables used were ER 70S3 to TIG and E71T-1 for the flux cored arc welding process. With the obtained results, it was concluded that it is possible to use the process cored wire solders to perform double fusion at the root, with full penetration, verifying the absence of defects in the ultrasonic test and macrographic analysis. How to double fusion welding with flux cored arc welding at the root is not a common technique in the market, it's necessary a suitable train to the welders and adjust welding parameters. The welding time obtained in flux cored arc welding was approximately 5 times lower compared to the TIG process and the total estimated cost of welding was approximately 3 times lower in the flux-cored arc welding compared to the TIG process.

LISTA DE FIGURAS

<u>Figura 2.1</u> - Processos de soldagem conhecidos x cronologia [1].....	5
<u>Figura 2.2</u> - Processo Eletrodo Revestido [2].....	6
<u>Figura 2.3</u> – Esquema do processo de Soldagem MIG/MAG [1].....	7
<u>Figura 2.4</u> - Esquema do equipamento de soldagem MIG/MAG [1].....	7
<u>Figura 2.5</u> - Esquema do equipamento para arame tubular [adaptado da ref. 14].....	9
<u>Figura 2.6</u> - Processo de Soldagem TIG [1].....	11
<u>Figura 2.7</u> - Representação soldagem TIG em corrente contínua polaridade direta (CC-) [1].....	13
<u>Figura 2.8</u> - Representação soldagem TIG em corrente contínua polaridade reversa (CC+) [1].....	13
<u>Figura 2.9</u> – Efeito da polaridade no processo TIG [2].....	14
<u>Figura 2.10</u> – Esquema da junta soldada com penetração total [4].....	15
<u>Figura 2.11</u> – Sequencia de soldagem com penetração total; [adaptado da ref. 4].....	15
<u>Figura 2.12</u> – Esquema de junta soldada com penetração total, chanfro em "K" e abertura de raiz [4].....	16
<u>Figura 2.13</u> – Tipos de chanfro [adaptado da ref. 4].....	18
<u>Figura 2.14</u> – Tipos de deformação [15].....	21

<u>Figura 2.15</u> – Efeito da velocidade de soldagem no formato da isoterma [16].....	22
<u>Figura 2.16</u> – Parcelas do custo total para a soldagem [13].....	23
<u>Figura 4.1</u> - Representação da Junta em "K".....	29
<u>Figura 4.2</u> - Montagem dos corpos de prova – Vista frontal.....	29
<u>Figura 4.3</u> - Montagem dos corpos de prova - Vista lateral.....	30
<u>Figura 4.4</u> – Representação de junta soldada na posição 2F [adaptado da ref. 14].....	33
<u>Figura 4.5</u> - Representação da soldagem sendo realizada simultaneamente... <td>33</td>	33
<u>Figura 4.6</u> - Representação do cálculo da área soldada e deformação.....	35
<u>Figura 5.1</u> – Macrografia do corpo de prova 01, experimento 01.....	39
<u>Figura 5.2</u> – Macrografia do corpo de prova 02, experimento 01.....	39
<u>Figura 5.3</u> – Macrografia do corpo de prova 03, experimento 01.....	40
<u>Figura 5.4</u> – Macrografia do corpo de prova 04, experimento 01.....	40
<u>Figura 5.5</u> – Macrografia do corpo de prova 05, experimento 01.....	41
<u>Figura 5.6</u> – Macrografia do corpo de prova 01, experimento 02.....	41
<u>Figura 5.7</u> – Macrografia do corpo de prova 02, experimento 02.....	42
<u>Figura 5.8</u> – Macrografia do corpo de prova 03, experimento 02.....	42
<u>Figura 5.9</u> – Macrografia do corpo de prova 04, experimento 02.....	43

<u>Figura 5.10</u> – Macrografia do corpo de prova 05, experimento 02.....	43
<u>Figura 5.11</u> - Representação do corpo de prova sem penetração total.....	44
<u>Figura 5.12</u> – Gráfico comparativo das áreas dos cordões de solda dos experimentos 01 e 02.....	46
<u>Figura 5.13</u> – Gráfico comparativo das médias e desvio padrão das áreas dos cordões de solda dos experimentos 01 e 02.....	47
<u>Figura 5.14</u> – Gráfico comparativo das deformações em função da energia de soldagem do experimento 01.....	49
<u>Figura 5.15</u> – Gráfico comparativo das deformações em função da energia de soldagem do experimento 02.....	50
<u>Figura 5.16</u> – Gráfico comparativo da média e desvio padrão das deformações medidas nos experimentos 01 e 02.....	50
<u>Figura 5.17</u> – Gráfico comparativo dos tempos de soldagem por corpo de prova dos experimentos 01 e 02.....	58
<u>Figura 5.18</u> – Gráfico comparativo da média e desvio padão do tempo de soldagem medido nos experimentos 01 e 02.....	58
<u>Figura 5.19</u> – Gráfico comparativo dos custos de mão de obra por corpo de prova dos experimentos 01 e 02.....	62
<u>Figura 5.20</u> – Gráfico comparativo da média e desvio padrão do custo de mão de obra dos experimentos 01 e 02.....	62
<u>Figura 5.21</u> – Gráfico comparativo dos custos do metal de adição por corpo de prova dos experimentos 01 e 02.....	65

Figura 5.22 – Gráfico comparativo da média e desvio padrão da massa do material depositado calculado nos experimentos 01 e 02.....	65
Figura 5.23 – Gráfico comparativo da média e desvio padrão do custo do material depositado calculado nos experimentos 01 e 02.....	66
Figura 5.24 – Gráfico comparativo da média e desvio padrão do custo do metal de adição calculado nos experimentos 01 e 02.....	67
Figura 5.25 – Gráfico comparativo dos custos do gás por corpo de prova dos experimentos 01 e 02.....	70
Figura 5.26 – Gráfico comparativo da média e desvio padrão do tempo de arco aberto medido nos experimentos 01 e 02.....	70
Figura 5.27 – Gráfico comparativo da média e desvio padrão do custo do gás calculado nos experimentos 01 e 02.....	71
Figura 5.28 – Gráfico comparativo dos custos totais da soldagem por corpo de prova dos experimentos 01 e 02.....	73
Figura 5.29 – Gráfico comparativo da média e desvio padrão do custo total da soldagem calculado nos experimentos 01 e 02.....	74

LISTA DE TABELAS

<u>Tabela 2.1</u> – Processos de soldagem [2].....	4
<u>Tabela 2.2</u> – Utilização das polaridades para diversos metais [2]	14
<u>Tabela 2.3</u> – Processos de soldagem e eficiência de transmissão [8]	19
<u>Tabela 4.1</u> Composição química do material utilizado.....	25
<u>Tabela 4.2</u> Propriedades mecânicas do material utilizado	25
<u>Tabela 4.3</u> Composição química do consumível utilizado	26
<u>Tabela 4.4</u> Propriedades mecânicas do consumível utilizado	26
<u>Tabela 4.5</u> Composição química do consumível utilizado	27
<u>Tabela 4.6</u> Propriedades mecânicas do consumível utilizado	27
<u>Tabela 4.7</u> – Matriz de experimentos utilizados.....	28
<u>Tabela 4.8</u> – Densidade aproximada de algumas ligas [13].....	36
<u>Tabela 4.9</u> – Valores típicos de eficiência de deposição [13].....	37
<u>Tabela 5.1</u> – Área do cordão de solda por corpo de prova, experimento 01...45	
<u>Tabela 5.2</u> – Área do cordão de solda por corpo de prova, experimento 02...45	
<u>Tabela 5.3</u> – Ângulo de deformação e energia de soldagem por corpo de prova experimento 01.....	48
<u>Tabela 5.4</u> – Ângulo de deformação e energia de soldagem por corpo de prova experimento 02.....	48
<u>Tabela 5.5</u> – Parâmetros de soldagem experimento 01, corpo de prova 01...52	
<u>Tabela 5.6</u> – Parâmetros de soldagem experimento 01, corpo de prova 02...52	
<u>Tabela 5.7</u> – Parâmetros de soldagem experimento 01, corpo de prova 03...53	
<u>Tabela 5.8</u> – Parâmetros de soldagem experimento 01, corpo de prova 04...53	

Tabela 5.9 – Parâmetros de soldagem experimento 01, corpo de prova 05...54	
Tabela 5.10 – Parâmetros de soldagem experimento 02, corpo de prova 01.....	54
Tabela 5.11 – Parâmetros de soldagem experimento 02, corpo de prova 02.....	55
Tabela 5.12 – Parâmetros de soldagem experimento 02, corpo de prova 03.....	55
Tabela 5.13 – Parâmetros de soldagem experimento 02, corpo de prova 04.....	56
Tabela 5.14 – Parâmetros de soldagem experimento 02, corpo de prova 05.....	56
Tabela 5.15 – Tempo médio de soldagem por corpo de prova, experimento 01.....	57
Tabela 5.16 – Tempo médio de soldagem por corpo de prova, experimento 02.....	57
Tabela 5.17 – Custos em unidades monetárias (UM).....	60
Tabela 5.18 – Cálculo do custo de mão de obra por corpo de prova experimento 01.....	60
Tabela 5.19 – Cálculo do custo de mão de obra por corpo de prova experimento 02.....	61
Tabela 5.20 – Cálculo do custo do metal de adição por corpo de prova do experimento 01.....	63
Tabela 5.21 – Cálculo do custo do metal de adição por corpo de prova do experimento 02.....	64

Tabela 5.22 – Cálculo do custo do gás por corpo de prova experimento 01...68
Tabela 5.23 – Cálculo do custo do gás por corpo de prova experimento 02...69
Tabela 5.24 – Cálculo do custo total da soldagem experimento 01.....72
Tabela 5.25 – Cálculo do custo total da soldagem experimento 02.....72

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

AL: Alongamento

ASME: American Society of Mechanical Engineers

ASTM: American Society For Testing And Materials

AT: Arame tubular

AWS: American Welding Society

CA: Corrente Alternada

CC: Corrente Contínua

CCPD: Corrente Contínua Polaridade Direta

CE: Carbono Equivalente

CJP: Complete Joint Penetration

CG: Custo do Gás

CMA: Custo do Metal de Adição

CMD: Custo do Metal Depositado

CMO: Custo de Mão de Obra

CP: Corpo de Prova

CTS: Custo Total da Soldagem

ED: Eficiência de Deposição

END's: Ensaios Não Destrutivos

EPS: Especificação de Procedimento de Soldagem

EVS: Ensaio Visual de Solda

FCAW: Flux Cored Arc Welding

GMAW: Gas Metal Arc Welding

GTAW: Gas Tungsten Arc Welding

LE: Limite de Escoamento

LR: Limite de Resistência

MIG: Metal Inert Gas

MAG: Metal Active Gas

MMD: Massa do Metal Depositado

MO: Mão de Obra

PAW: Plasma Arc Welding

RQPS: Registro de Qualificação de Procedimento de Soldagem

SMAW: Shielded Metal Arc Welding

TIG: Tungsten Inert Gas

US: Ultra-som

UM: Unidade Monetária

ZAC: Zona Afetada pelo Calor

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	v
AGRADECIMENTOS	vi
CURRICULUM VITAE.....	vii
RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
LISTA DE TABELAS.....	xiv
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS	xvii
SUMÁRIO.....	xix
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 PROCESSOS DE SOLDAGEM.....	3
2.1.1 PROCESSO DE SOLDAGEM POR ELETRODO REVESTIDO.....	5
2.1.2 PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG.	6
2.1.3 PROCESSO DE SOLDAGEM ARAME TUBULAR.....	8
2.1.4 PROCESSO DE SOLDAGEM TIG – TUNGSTEN INERT GAS.....	10
2.2 SOLDAGEM DE PENETRAÇÃO TOTAL	15
2.3 SOLDAGEM COM A TÉCNICA DA DUPLA FUSÃO	16
2.4 FATORES QUE INFLUENCIAM NA PENETRAÇÃO DA SOLDA.....	17
2.4.1 TIPO DE JUNTA.	17
2.4.2 ENERGIA DE SOLDAGEM.....	18
2.5 SOLDABILIDADE.	19
2.6 FATORES QUE INFLUENCIAM NA DISTORÇÃO E DEFORMAÇÃO.....	20

2.7 CUSTOS DA SOLDAGEM.....	22
3. OBJETIVOS.....	24
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
4.1 MATERIAIS	25
4.1.1 METAL BASE.....	25
4.1.2 CONSUMÍVEIS DE SOLDAGEM.	26
4.2 MÉTODO.	27
4.2.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.	27
4.2.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA EXECUSSÃO.	30
4.2.3 MÉTODO UTILIZADO NA EXECUÇÃO.	31
4.3 ENSAIOS REALIZADOS.	34
4.3.1 ENSAIO POR ULTRA-SOM.....	34
4.3.2 ANÁLISE MACROGRÁFICA.....	34
4.3.3 ANÁLISE DO CUSTO DA SOLDAGEM.....	34
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.	38
5.1 ENSAIO POR ULTRA-SOM	38
5.2 MACROGRAFIA.....	38
5.2.1 PENETRAÇÃO.....	38
5.2.2 ÁREA DOS CORDÕES DE SOLDA	45
5.2.3 ÂNGULO DE DEFORMAÇÃO.....	48
5.3 CUSTOS DA SOLDAGEM ENTRE OS EXPERIMENTOS.....	51
5.3.1 TEMPO DA SOLDAGEM	51
5.3.2 CUSTOS DA SOLDAGEM	59
6. CONCLUSÕES.....	75

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	76
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:	77

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.

Com a alta competitividade das indústrias brasileiras, a concorrência com o mercado externo e a crescente demanda por produtos de maior qualidade e menor custo, é constante a busca das indústrias em desenvolver processos que gerem redução nos custos na fabricação, aumentem a velocidade e reduzam o retrabalho através de melhores técnicas aplicadas aos processos.

Atualmente, o processo soldagem mais utilizado para realizar o passe de raiz nos tanques de transformadores de potencia, chapa de 16 milímetros de espessura e material ASTM A36, é o TIG utilizando-se a técnica da dupla fusão, que é a soldagem simultânea da raiz, na mesma poça de fusão, com adição de material em lados opostos da junta.

A soldagem utilizando a técnica da dupla fusão apresenta um ganho de produtividade e redução de custo, pois, elimina a atividade de goivagem e o ensaio não destrutivo no lado oposto à raiz do cordão de solda, atividades estas necessárias quando o passe de raiz é realizado em um lado da junta, e, depois, o outro lado.

Buscando aumentar a produtividade e reduzir os custos, mantendo a qualidade requerida na fabricação, pretende-se através deste estudo, avaliar a viabilidade do uso do processo de soldagem arame tubular para soldagem do passe de raiz utilizando a técnica da dupla fusão. Além de avaliar a viabilidade, será feito um comparativo entre os processos arame tubular e TIG em termos de custo, velocidade na soldagem e qualidade.

O processo de soldagem arame tubular é conhecido pela alta produtividade e alta taxa de deposição [3]. Já o processo TIG, apesar de ser um processo conhecido por apresentar cordões de solda de alta qualidade, é um processo que a velocidade de soldagem é menor e baixa taxa de deposição [1].

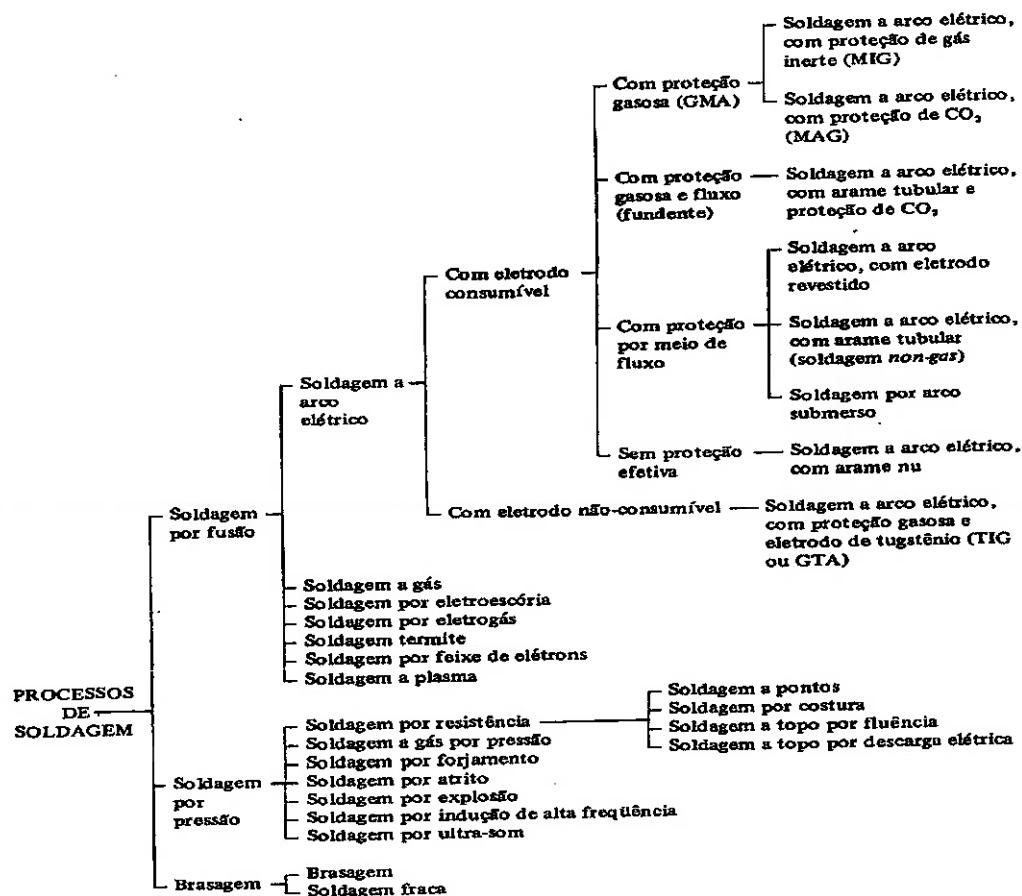
Para medir a produtividade da soldagem, foi utilizada a medição do tempo de soldagem por metro linear de cordão de solda. Para medir a qualidade da solda, será utilizado o ensaio por ultra-som e análise macrográfica, com o objetivo de identificar defeitos decorrentes do processo de soldagem. Será utilizado o tempo de soldagem e as macrografias para cálculo do custo da soldagem. Através destas medições, espera-se conseguir identificar qual processo de soldagem apresenta maior produtividade, qualidade e menor custo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

2.1 PROCESSOS DE SOLDAGEM.

A soldagem é definida como a união de duas partes metálicas, através de uma fonte de calor, aplicando pressão ou não, resultando na continuidade da matéria [1].

Atualmente, há muitos processos de soldagem que foram desenvolvidos ao longo do ultimo século. Segue a Tabela 2.1 abaixo, mostrando os tipos de processos [2] e a Figura 2.1 relaciona a descoberta dos processos de soldagem com o tempo [1].

Tabela 2.1 – Processos de soldagem [2]

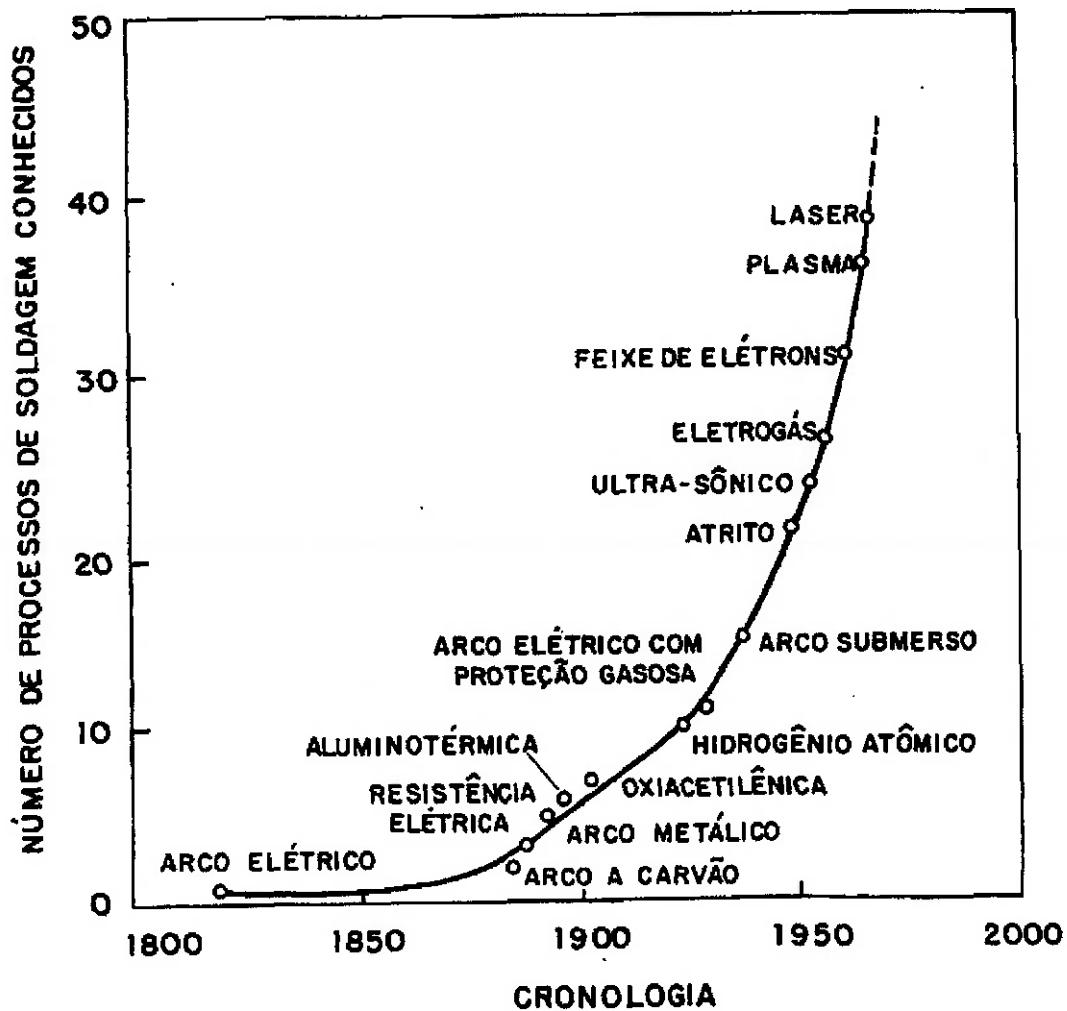


Figura 2.1 - Processos de soldagem conhecidos x cronologia [1]

2.1.1 PROCESSO DE SOLDAGEM POR ELETRODO REVESTIDO.

O processo de soldagem a arco por eletrodo revestido ainda é o processo mais empregado atualmente, devido ao baixo custo do seu equipamento e a facilidade de realizar soldagens em locais de difícil acesso [1]. O processo consiste em um arame revestido com materiais fundentes específicos, que ao entrarem em contato com o arco elétrico gerado entre o eletrodo e o metal de base, transferem o material em forma de gotas para a poça de fusão. Além de uma parte do revestimento ser transformado em escória para a proteção do cordão, o mesmo tem a função de estabilizar o arco e adicionar elementos de

liga à junta soldada. O processo pode ser alimentado em Corrente Contínua ou Corrente Alternada [2]. A figura 2.2 exemplifica este processo.

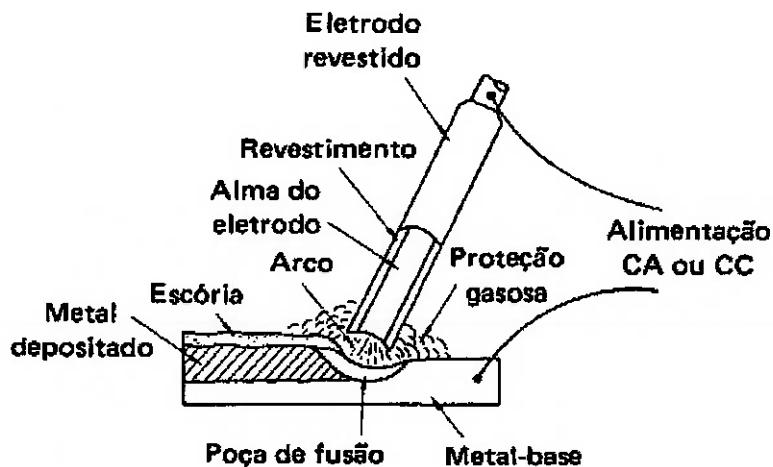


Figura 2.2 - Processo Eletrodo Revestido [2]

2.1.2 PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG.

O processo MIG/MAG é um processo de soldagem onde o arco elétrico é utilizado como fonte de calor, para promover a soldagem entre o eletrodo nu (arame) e o metal de base [1]. Os gases mais utilizados são o hélio, argônio, dióxido de carbono ou uma mistura deles para proteger a poça de fusão do ar atmosférico [2]. O eletrodo consumível utilizado é o arame sólido. A soldagem pode ser feita de modo manual ou automatizada com alta taxa de deposição [2].

A sigla MIG significa Metal Inert Gas, quando utiliza gases inertes, hélio ou argônio. Já o MAG (Metal Active Gas) utiliza como o dióxido de carbono na proteção da poça de fusão, que é um gás ativo [2].

A figura 2.3 mostra esquematicamente o processo.

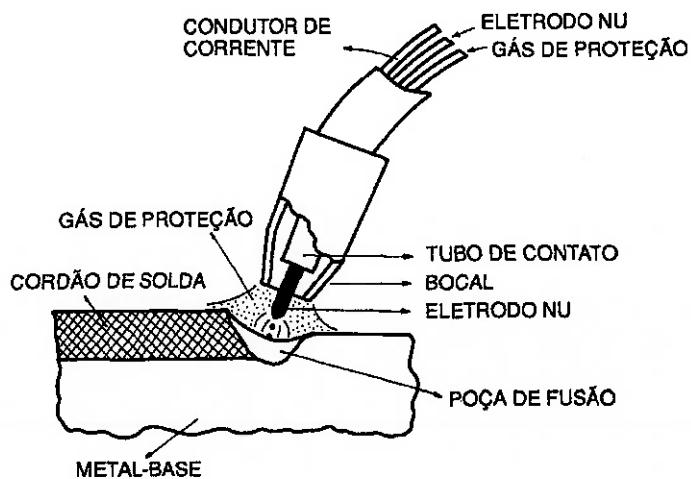


Figura 2.3 – Esquema do processo de Soldagem MIG/MAG [1]

O processo MIG/MAG utiliza como fonte de energia um gerador ou retificador, com característica construtiva de tensão constante. A soldagem, na maioria dos casos, é feita na corrente contínua, polaridade inversa (CC+). O processo permite a regulação para alguns tipos de transferências metálicas, como globular, curto circuito, spray e pulsado. A figura 2.4 mostra o esquema do processo de soldagem MIG/MAG [1].

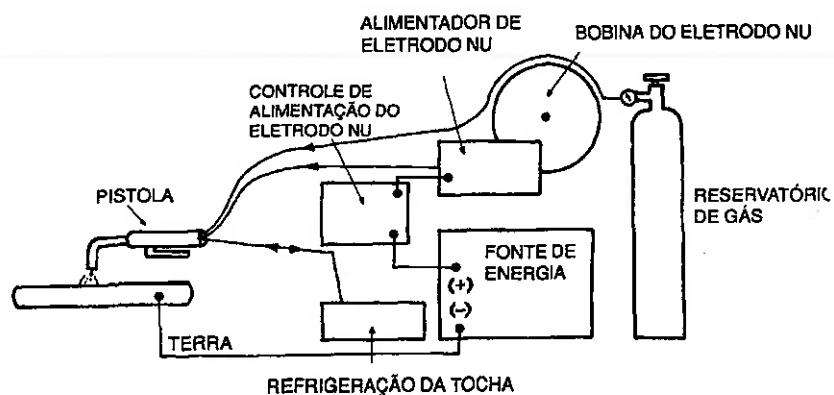


Figura 2.4 - Esquema do equipamento de soldagem MIG/MAG [1]

2.1.3 PROCESSO DE SOLDAGEM ARAME TUBULAR.

2.1.3.1 CONCEITO.

O processo arame tubular é classificado como um processo por fusão.

Neste processo o calor para a soldagem é produzido pelo arco elétrico entre o eletrodo metálico e o metal de base. O processo tem duas principais características, uma delas é a necessidade de utilização de um gás de proteção externo que protege o arco do oxigênio e o nitrogênio presentes na atmosfera. A outra é o fluxo interno presente no núcleo do consumível, que tem como função formar escória, agente desoxidante, estabilizador de arco e adicionar elementos de liga [3].

2.1.3.2 EQUIPAMENTO.

O processo arame tubular pode utilizar sistemas de soldagem semiautomáticos, mecanizados ou totalmente automáticos. Basicamente o equipamento se resume a uma fonte de energia, sistema de alimentação do arame e pistola de solda [3].

A figura 2.5 demonstra o esquema de um equipamento semiautomático.

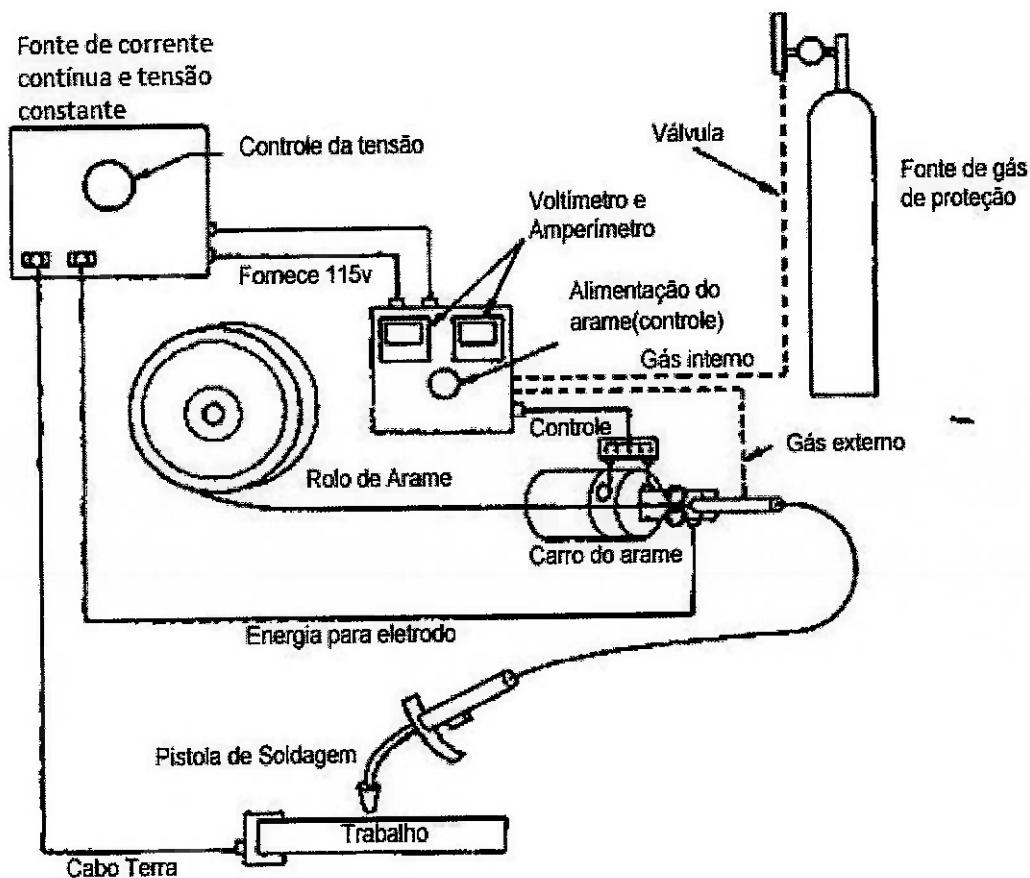


Figura 2.5 - Esquema do equipamento para arame tubular [adaptado da ref.

14]

O equipamento utilizado no processo arame tubular com proteção gasosa é tipicamente o mesmo utilizado no processo MIG/MAG.

2.1.3.3 VANTAGENS E LIMITAÇÕES.

Dentre as vantagens podemos destacar: altas taxas de deposição, menor habilidade do soldador quando comparado ao processo MIG/MAG, mais simples e adaptável quando comparável ao processo Arco Submerso e maior penetração quando comparado ao processo Eletrodo Revestido [3].

Quanto as limitações podemos destacar: necessário a remoção da escória, são produzidos mais fumos neste processo quando comparado ao MIG/MAG e o equipamento é mais complexo e menos portátil quando comparado ao equipamento utilizado no processo Eletrodo Revestido [14].

2.1.4 PROCESSO DE SOLDAGEM TIG – TUNGSTEN INERT GAS.

2.1.4.1 CONCEITO.

O processo de soldagem TIG (Tungsten Inert Gás) é um processo que utiliza o arco elétrico como fonte de calor, mantido entre o eletrodo não consumível de tungstênio e a peça a ser soldada. A região a ser soldada é protegida através de um fluxo de um gás inerte, normalmente Argônio, devido ao baixo custo em relação ao gás Hélio. A soldagem pode ser feita com metal de adição ou sem metal de adição (autógena). Este processo pode ser manual ou automático [1].

A Figura 2.6 mostra os detalhes.

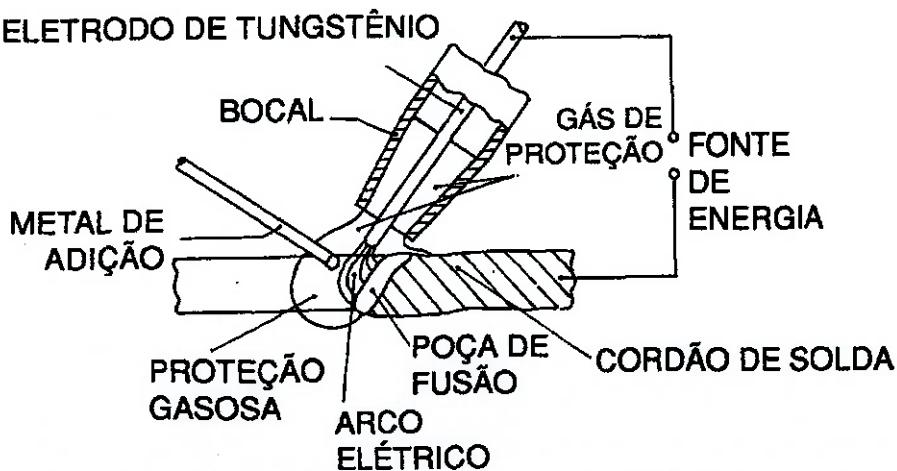


Figura 2.6 - Processo de Soldagem TIG [1]

2.1.4.2 EQUIPAMENTOS.

Os equipamentos utilizados na soldagem manual TIG são:

Três opções de fonte de energia de corrente constante: geradores, retificadores ou transformadores. Pedaços são adaptados, quando a soldagem é manual, para auxiliar o soldador no controle da corrente elétrica, a fim de controlar rechups de cratera no final dos cordões [1].

Unidade de alta frequência: é um equipamento requerido quando se deseja soldar em Corrente Alternada (CA) e uma fonte de energia não a possui. É necessário que tenha regulador de intensidade e controle de vazão de gás de proteção [1].

Reservatório de gás: utilizam-se reservatórios cilíndricos com reguladores de pressão e vazão [1].

Tocha TIG: é o dispositivo usado pelo soldador na soldagem manual e tem como finalidade fixar o eletrodo de tungstênio e conduzir o gás de proteção inerte até a poça de fusão [1].

2.1.4.3 VANTAGENS E LIMITAÇÕES.

Dentre as vantagens do processo TIG, podemos destacar: soldas de alta qualidade, aplicável a maioria dos metais e ligas, baixa ocorrência de distorção e processo de fácil aprendizagem [1].

Dentre as limitações, podemos destacar: baixa taxa de deposição, necessário soldar em locais protegidos livre de corrente de ar e possibilidade de inclusão de tungstênio no cordão de solda [1].

2.1.4.4 PROPRIEDADES ELÉTRICAS.

No processo TIG, temos a soldagem em Corrente Contínua, polaridade direta (CC-), em que o eletrodo está ligado no polo negativo, conforme Figura 2.7. Os elétrons são transferidos do eletrodo para o metal de base e os íons positivos são transferidos para o eletrodo. Dessa forma, a chapa aquece mais que o eletrodo, garantindo melhor penetração [1]. A soldagem pode ser feita também na Corrente Contínua, polaridade reversa (CC+), conforme Figura 2.8, sendo o eletrodo ligado no polo positivo e o metal de base no polo negativo, isto é, o contrário da CC-, os elétrons são transferidos da chapa para o eletrodo de tungstênio, aquecendo-o e os íons positivos do eletrodo para o metal de base. Ao utilizar Argônio como gás de proteção e CC+, foram observados que

ocorre limpeza dos óxidos, principalmente em ligas de Magnésio e Alumínio [2].

Já na Corrente Alternada (CA), o processo TIG oscila tanto para CC+ quanto para CC-, com comportamento senoidal. A qualidade final do cordão é intermediária ao CC+ e CC- [2].

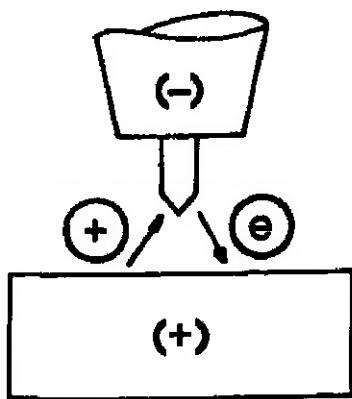


Figura 2.7 - Representação soldagem TIG em corrente contínua polaridade direta (CC-) [1]

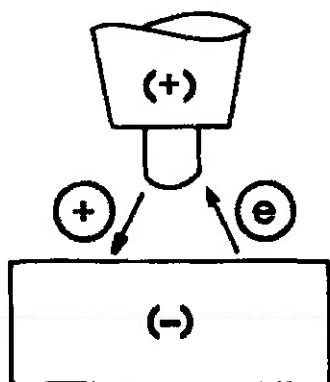


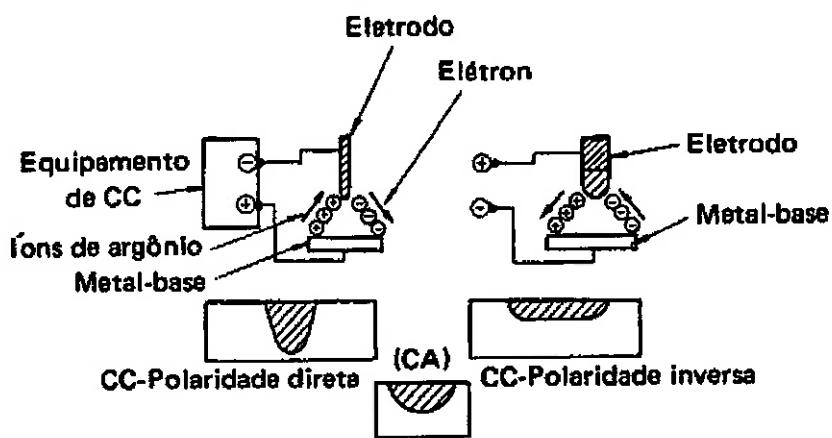
Figura 2.8 - Representação soldagem TIG em corrente contínua polaridade reversa (CC+) [1]

A tabela 2.2 mostra os casos da utilização das polaridades para diversos metais.

Tabela 2.2 – Utilização das polaridades para diversos metais [2]

Metal	Corrente Alternada com Alta Freqüência	Corrente Contínua Polaridade Direta	Corrente Contínua Polaridade Inversa
Aço Aço inoxidável Ferro fundido Alumínio e suas ligas	Limitada Limitada Limitada Adequada	Adequada Adequada Adequada —	— — —
Magnésio e suas ligas	Adequada	—	Possível para chapas finas
Cobre e suas ligas Bronze alumínio	Limitada Adequada	Adequada Limitada	Possível para chapas finas —

A figura 2.9 mostra o efeito da corrente contínua polaridade direta, inversa e corrente alternada [2].

**Figura 2.9 – Efeito da polaridade no processo TIG [2]**

2.2 SOLDAGEM DE PENETRAÇÃO TOTAL.

A soldagem com penetração total ocorre quanto há fusão entre o consumível e o metal de base desde a raiz até a face do chanfro. A figura 2.10 mostra o esquema de uma junta soldada com penetração total [4].

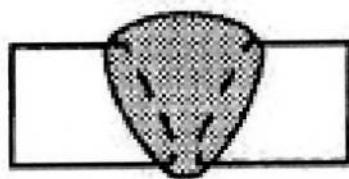


Figura 2.10 – Esquema da junta soldada com penetração total [4]

A figura 2.11 demonstra a sequencia de preparação de uma junta para soldagem de penetração total pelo método convencional [4].

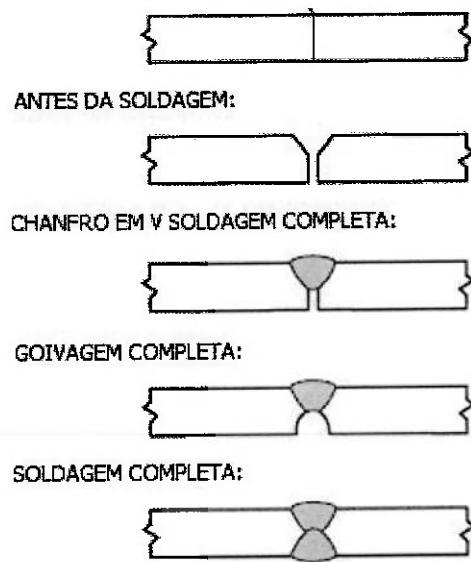


Figura 2.11 – Sequencia de soldagem com penetração total; [adaptado da ref. 4]

A falta de penetração ocorre quando não há a união completa da espessura das duas partes que estão sendo soldadas [5].

As principais causas para a falta de penetração são a baixa energia de soldagem, consumível inadequado para a geometria do chanfro, tipo de chanfro, geometria ou abertura de raiz inadequado e aplicação incorreta do procedimento de soldagem [5].

Na figura 2.12 observa-se o esquema de uma junta soldada com penetração total, chanfro em "K" e abertura de raiz [4].

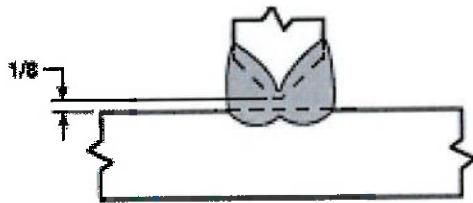


Figura 2.12 – Esquema de junta soldada com penetração total, chanfro em "K" e abertura de raiz [4]

2.3 SOLDAGEM COM A TÉCNICA DA DUPLA FUSÃO

Não existem muitas bibliografias que descrevem a técnica da dupla fusão utilizando dois eletrodos simultaneamente, portanto serão apresentados alguns estudos realizados pela Universidade de Kentucky sobre esta técnica.

Um estudo descreve que utilizando o processo de soldagem MIG/MAG (com metal de adição) em conjunto com o processo TIG (sem metal de adição), no mesmo lado de peça, podem-se obter as seguintes vantagens: aumento da

taxa de deposição, diminuir o aporte de calor no metal de base, diminuir a tensão residual e a distorção. Este processo foi chamado de processo de soldagem a arco com proteção gasosa com duplo eletrodo [6].

Outro estudo descreve a soldagem utilizando dois eletrodos conectados em série a uma única fonte de energia, posicionados em lados opostos ao metal de base, sendo um no processo de soldagem a Plasma (PAW) e outro no processo a arco com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa (TIG), ambos sem metal de adição. Os resultados obtidos foram o aumento da penetração do cordão de solda, melhora da microestrutura do metal de base e diminuição da distorção [7].

2.4 FATORES QUE INFLUENCIAM NA PENETRAÇÃO DA SOLDA.

2.4.1 TIPO DE JUNTA.

A junta deve ser projetada de forma a permitir a penetração da solda em toda a espessura da peça [2].

O chanfro tipo V é muito utilizado, pois facilita a transmissão de calor para a junta, devido à espessura de o material ser localmente diminuída no local a ser soldado [1].

A figura 2.13 exemplifica outros tipos de chanfro utilizados na soldagem.

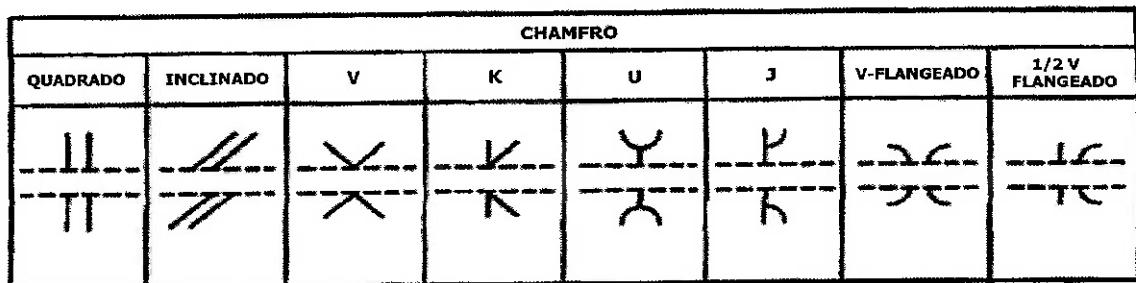


Figura 2.13 – Tipos de chanfro [adaptado da ref. 4]

2.4.2 ENERGIA DE SOLDAGEM.

A energia de soldagem (E) é a quantidade de energia por cordão de solda, calculada através do produto da eficiência de transmissão de calor (η), pela tensão do arco (V) e corrente de soldagem (I), dividido pela velocidade de soldagem (v), como mostrado na equação 1 [8].

$$E = \eta [(V \times I) / v] \quad (1)$$

Onde:

E = energia de soldagem [$J.m^{-1}$];

η = eficiência de transmissão de calor;

V = tensão do arco [V];

I = corrente de soldagem [A];

v = velocidade de soldagem [m/s]

A tabela 2.3 representa os valores da eficiência de transmissão de calor em função dos processos de soldagem, material e gás de proteção.

Tabela 2.3 – Processos de soldagem e eficiência de transmissão [8]

Processo de soldagem	Eficiência de transmissão (η)	
	Intervalo	Valor médio
Laser e feixe de elétrons	0,02 – 0,08	0,05
TIG (Argônio, Al)	0,22 – 0,46	0,40
TIG (Hélio, Al)	0,55 – 0,80	0,60
TIG (Argônio, aço)	0,22 – 0,75	0,40
MIG/MAG (Argônio, aço)	0,66 – 0,70	0,70
MIG/MAG (CO ₂ , aço)	0,75 – 0,93	0,85
Eletrodo revestido (aço)	0,80 – 0,85	0,80
Arco Submerso (aço)	0,91 – 0,99	0,95

2.5 SOLDABILIDADE.

A soldabilidade, segundo AWS [9], “é a capacidade do material ser soldado sob condição de fabricação impostas em uma estrutura ou um componente específico e devidamente projetado para executar satisfatoriamente a função a que se destina”.

Para melhor entender esta definição, podemos dividir a soldabilidade em três categorias [10]:

Quanto à parte operacional: está ligada aos processos de soldagem, preparação e montagem da junta, acesso e habilidade do soldador.

Quanto à execução do projeto: está ligado ao desempenho e a vida útil do equipamento soldado, executar o projeto conforme especificado para que o mesmo atinja a durabilidade esperada.

Quanto às propriedades do material: está ligada às propriedades químicas, condições térmicas e propriedades mecânicas não projetadas que podem ocasionar defeitos na solda.

Em relação às propriedades químicas do material, a soldabilidade pode ser mensurada através do cálculo do carbono equivalente, conforme a equação 2 [1]:

$$CE = \%C + (\%Mn/6) + [(\%Cr+\%Mo+\%V)/5] + [(\%Ni+\%Cu)/15] \quad (2)$$

Quanto maior o valor do carbono equivalente, maior a sua temperabilidade e pior a soldabilidade, aumentando assim a suscetibilidade à trinca induzida por hidrogênio [1].

2.6 FATORES QUE INFLUENCIAM NA DISTORÇÃO E DEFORMAÇÃO.

A distorção é resultado da deformação plástica ocorrida durante o aquecimento e resfriamento ocorridos durante a soldagem. Esta deformação produz tensões residuais resultando em contração longitudinal, contração transversal, deformação angular ou o empenamento que modificarão a forma geométrica de um equipamento ou estrutura [11].

A figura 2.14 demonstra os tipos de deformação que ocorrem numa estrutura ou equipamento.

1 - contração longitudinal

2 - contração transversal

3 - deformação angular

4 - empenamento

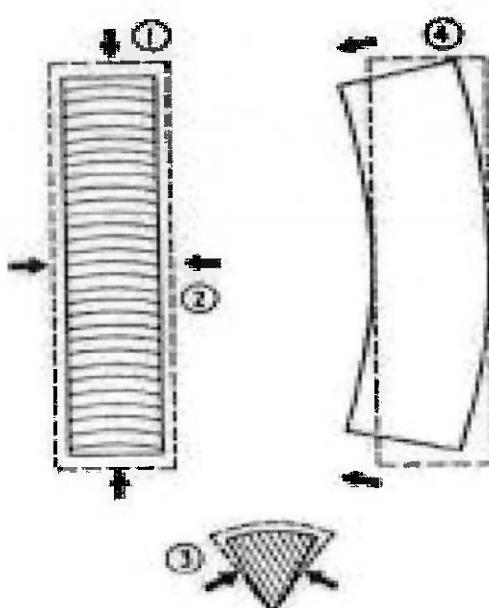


Figura 2.14 – Tipos de deformação [15]

As deformações durante a soldagem são inevitáveis, porém, podem ser minimizadas dependendo do procedimento utilizado na montagem e na fabricação da junta [12].

Também podemos controlar a distorção ao aplicar restrições durante a soldagem, controlando a velocidade de soldagem, alterando a geometria do chanfro, soldar de forma intermitente e controlar as características do material a ser soldado como: coeficiente de expansão térmica, a condutividade térmica, o modulo de elasticidade e o limite de resistência [11].

A figura 2.15 representa a influência da velocidade de soldagem no formato das isotermas que influenciará diretamente na deformação.

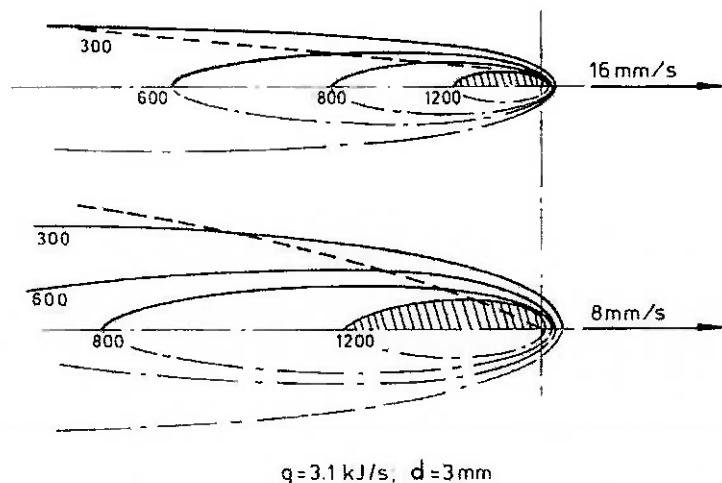


Figura 2.15 – Efeito da velocidade de soldagem no formato da isoterma [16]

2.7 CUSTOS DA SOLDAGEM.

O custo da soldagem pode ser calculado de forma simplificada conforme a equação 3 [13].

$$CT = CMO + CC + CE + CM + CD + CMC \quad (3)$$

Onde:

CT = custo total;

CMO = custo de mão de obra;

CC = custo dos consumíveis;

CE = custo de energia elétrica;

CM = custo de manutenção;

CD = custo de depreciação;

CMC = custo de outros materiais de consumo.

A figura 2.14 representa o percentual a que cada custo se representa no cálculo do custo total da soldagem quando considerados os custos fixos de uma empresa.

Somados, os custos de mão de obra e o custos dos consumíveis representam cerca de 93% do custo da soldagem. Dependendo da precisão que se deseja alcançar, no cálculo do custo da soldagem podem ser considerados todos os fatores apontados acima ou parte deles [13].

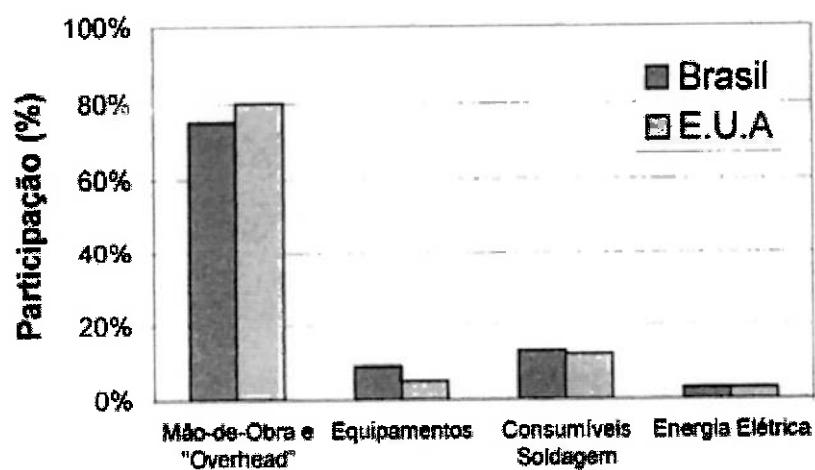


Figura 2.16 – Parcelas do custo total para a soldagem [13]

3. OBJETIVOS.

O objetivo deste trabalho é comparar em termos de tempo de soldagem, custo e deformação angular os processos de soldagem arame tubular e TIG usando a técnica da dupla fusão em lados opostos da junta no passe de raiz.

4. MATERIAIS E MÉTODOS.

4.1 MATERIAIS.

4.1.1 METAL BASE

O metal de base utilizado foi ASTM A-36 cuja composição química e propriedades mecânicas fornecidas pelo fabricante estão representadas nas tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1 Composição química do material utilizado

ASTM A-36 Certificado 5471	C	Mn	P	S	Si	Al	Cu
	0,16	1,06	0,019	0,009	0,298	0,029	0,016
	Mo	Cr	Ni	Nb	V	Ti	N
	0,002	0,016	0,011	0,000	0,003	0,001	0,0055

Tabela 4.2 Propriedades mecânicas do material utilizado

ASTM A-36 Certificado 5471	LE - Limite de escoamento (MPa)	LR - Limite de resistência à tração (MPa)	LE / LR (%)	AL - Alongamento (%)
	305,3	469,5	65	27,5

4.1.2 CONSUMÍVEIS DE SOLDAGEM.

4.1.2.1 CONSUMÍVEL UTILIZADO NO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG

O metal de adição utilizado na soldagem dos corpos de prova foi a vareta ER-70S3, diâmetro de 2,4mm, cuja composição química e propriedades mecânicas fornecidas pelo fabricante estão representadas nas tabelas 4.3 e 4.4.

Tabela 4.3 Composição química do consumível utilizado

ER 70S3 Certificado 578593-SJC	C	Si	Mn	P	Cu	S	Ni
	0,08	0,570	1,030	0,022	0,01	0,012	0,01
	Mo	V	Cu	-	-	-	-
	0,005	0,001	0,02	-	-	-	-

Tabela 4.4 Propriedades mecânicas do consumível utilizado

ER 70S3 Certificado 578593-SJC	LE - Limite de escoamento (MPa)	LR - Limite de resistência à tração (MPa)	AL - Alongamento (%)
	400	450	22

4.1.2.2 CONSUMÍVEL UTILIZADO NO PROCESSO DE SOLDAGEM ARAME

TUBULAR

O metal de adição utilizado na soldagem dos corpos de prova foi o E 71T-1, diâmetro de 1,6mm cuja composição química e propriedades mecânicas fornecidas pelo fabricante estão representadas nas tabelas 4.5 e 4.6.

Tabela 4.5 Composição química do consumível utilizado

E 71T-1 Certificado 000482754	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
	0,045	0,600	1,210	0,017	0,011	0,020	0,010
	Ni	V	Cu	-	-	-	-
	0,030	0,020	0,020	-	-	-	-

Tabela 4.6 Propriedades mecânicas do consumível utilizado

E 71T-1 Certificado 000482754	LE - Limite de escoamento (MPa)	LR - Limite de resistência à tração (MPa)	AL - Alongamento (%)
	510	578	31

4.1.2.3 GÁS UTILIZADO NA SOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Para a soldagem no processo de soldagem a arco elétrico com arame tubular com proteção gasosa, foi utilizado dióxido de carbono (99,9%).

Para a soldagem a arco elétrico com proteção gasosa com eletrodo não consumível e eletrodo de tungstênio, o processo TIG, foi utilizado o argônio (99,9%).

4.2 MÉTODO.

4.2.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.

Para os experimentos realizados, foram utilizados 05 corpos de prova para a soldagem no processo TIG (experimento 01) e 05 corpos de prova para

o processo arame tubular (experimento 02). A matriz de experimentos está na tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Matriz de experimentos utilizados.

EXPERIMENTO		PROCESSO DE SOLDAGEM
01	1A	TIG COM DUPLA FUSÃO
	1B	
	1C	
	1D	
	1E	
02	2A	ARAME TUBULAR COM DUPLA FUSÃO
	2B	
	2C	
	2D	
	2E	

Para a construção de cada corpo de prova foram cortadas 02 chapas com 1.000mm de comprimento, 140mm de largura e 16mm de espessura. As chapas foram chanfradas com ângulo de bisel a 45° pelo processo de oxicorte. Antes da montagem dos corpos de prova, as chapas foram usinadas em ambos os lados retirando de cada lado aproximadamente 0,5mm de espessura do material, com o objetivo de remover imperfeições na planicidade da chapa.

As chapas foram montadas a 90° de forma que a soldagem será realizada em ângulo em ambos dos lados da junta, conforme demonstra o croqui na Figura 4.1. As Figuras 4.2 e 4.3 mostram os corpos de prova montados.

Este tipo de chanfro é denominado chanfro “K” [4].

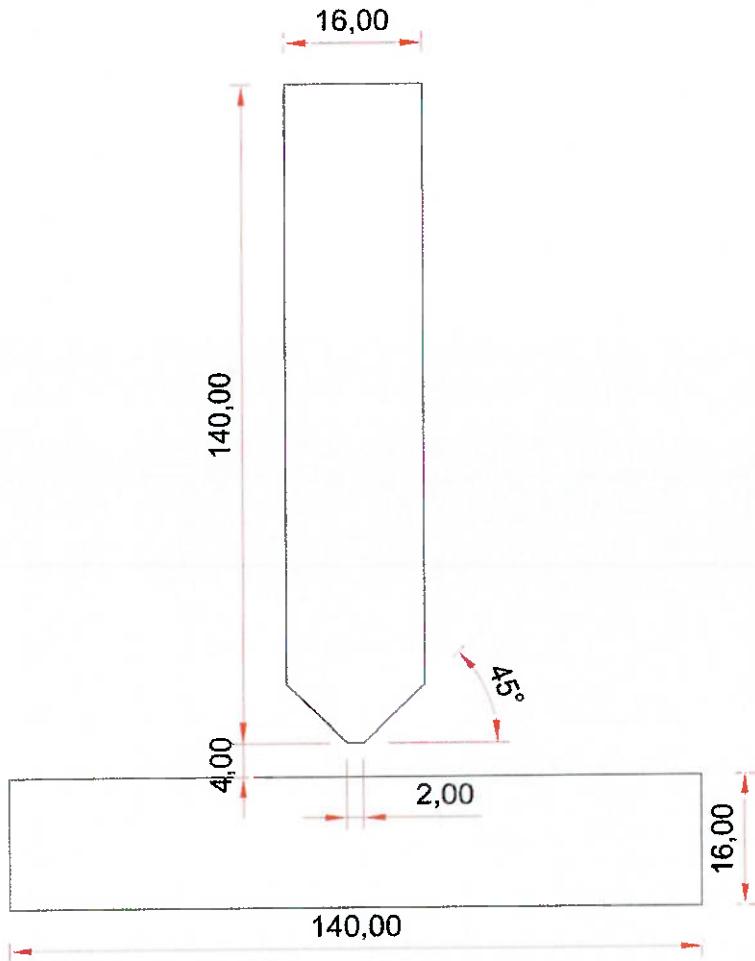


Figura 4.1 - Representação da Junta em "K"



Figura 4.2 - Montagem dos corpos de prova – Vista frontal



Figura 4.3 - Montagem dos corpos de prova - Vista lateral

4.2.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA EXECUSSÃO.

Para a soldagem no processo TIG (experimento 01), foi utilizada a máquina de soldagem modelo DPT – 300 e para soldagem no arame tubular (experimento 02) foi utilizada a máquina de soldagem modelo Tubular 558 TP.

O controle dimensional dos corpos de prova foi feito através de paquímetro, calibre de solda e trena.

No controle dos parâmetros de processo, a vazão do gás de proteção foi controlada utilizando medidor de vazão. Para o controle de corrente e tensão foi utilizado um alicate amperímetro digital ET-3810. Para controle da temperatura foi utilizado termômetro digital. O tempo da soldagem foi medido através de cronometro digital.

4.2.3 MÉTODO UTILIZADO NA EXECUÇÃO.

4.2.3.1 MÉTODO UTILIZADO NO EXPERIMENTO 01 – SOLDAGEM POR DUPLA FUSÃO NO PROCESSO TIG

Os corpos de prova foram posicionados conforme as fotografias representadas nas figuras 4.2 e 4.3. O passe de raiz foi realizado na temperatura ambiente, temperatura do metal base 21°C. A corrente utilizada foi CC (-) (corrente contínua polaridade direta). A soldagem dos corpos de prova foi realizada na posição 2F, ou seja, posição horizontal para junta em ângulo [14], conforme representado na figura 4.4. Para realização do cordão de solda de raiz foi utilizada a técnica da dupla fusão onde os dois soldadores depositam metal de adição simultaneamente em lados opostos da peça na mesma poça de fusão, conforme representado na figura 4.5. Após o passe de raiz aguardou-se até que a temperatura do metal de base estivesse abaixo de 250°C. Foram realizados mais doze passes para enchimento de forma alternada, ou seja, um soldador por vez, sempre respeitando a temperatura de interpasso.

Os registros dos parâmetros de soldagem, vazão do gás de proteção, corrente, tensão, velocidade de soldagem e tempo de soldagem por corpo de prova medido durante a soldagem estão apontados nos resultados, tabelas 5.5 a 5.9.

4.2.3.2 MÉTODO UTILIZADO NO EXPERIMENTO 02 – SOLDAGEM POR DUPLA FUSÃO NO PROCESSO ARAME TUBULAR

Os corpos de prova foram posicionados conforme as fotografias representadas nas figuras 4.2 e 4.3. O passe de raiz foi realizado na temperatura ambiente, temperatura do metal base 21°C. A corrente utilizada foi CC (+) (corrente contínua polaridade reversa). A soldagem dos corpos de prova foi realizada na posição 2F, ou seja, posição horizontal para junta em ângulo [14], conforme representado na figura 4.4. Para realização do cordão de solda de raiz foi utilizada a técnica da dupla fusão onde os dois soldadores depositam metal de adição simultaneamente em lados opostos da peça na mesma poça de fusão, conforme representado na figura 4.5. Após o passe de raiz foi realizada a limpeza do cordão de solda e aguardou-se até que a temperatura do metal de base estivesse abaixo de 250°C. Foram realizados mais doze passes para enchimento de forma alternada, ou seja, um soldador por vez, sempre respeitando a temperatura de interpasse e realizando a limpeza do cordão de solda.

Os registros dos parâmetros de soldagem, vazão do gás de proteção, corrente, tensão, velocidade de soldagem e tempo de soldagem por corpo de prova medido durante a soldagem estão apontados nos resultados, tabelas 5.10 a 5.14.

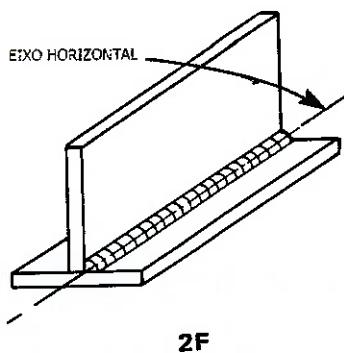


Figura 4.4 – Representação de junta soldada na posição 2F [adaptado da ref. 14]



Figura 4.5 - Representação da soldagem sendo realizada simultaneamente

4.3 ENSAIOS REALIZADOS.

Para verificar a penetração da solda e identificar defeitos que possam ter ocorridos na soldagem, foram realizados os ensaios de ultra-som e macrografia em todos os corpos de prova dos dois experimentos.

4.3.1 ENSAIO POR ULTRA-SOM.

O ensaio de ultra-som foi realizado conforme as normas ASME VIII div. 1 Ed. 2007 e N1594 rev. F, utilizando o aparelho Sitescan Sonatest 150 S.

4.3.2 ANÁLISE MACROGRÁFICA.

A realizar as macrografias foram seguidos os procedimentos estabelecidos na norma ASME IX Ed. 2010 [14]. As amostras foram preparadas conforme o QW-462.4(a) e o ensaio realizado conforme QW-183. O ataque químico foi feito com ácido clorídrico para melhorar a visualização do material analisado conforme definido na norma.

Os instrumentos utilizados foram microscópio portátil (Régua Graduada) termo higrômetro para controle das condições ambientais. O ensaio foi realizado a temperatura de 25°C.

4.3.3 ANÁLISE DO CUSTO DA SOLDAGEM.

Para a análise do custo da soldagem foi medido o tempo de soldagem através de cronometro digital e estão representados tabelas 5.5 a 5.14. e medido a área do cordão de solda encontrada em cada corpo de prova.

A figura 4.6 representa como foi feito o cálculo do ângulo de deformação e área da solda.

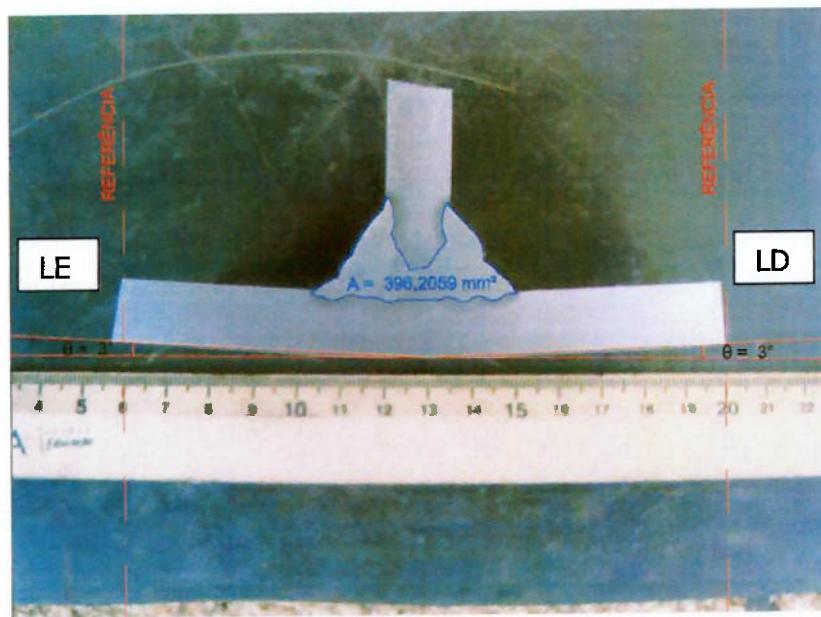


Figura 4.6 - Representação do cálculo da área soldada e deformação

Conforme descrito no item 2.7, os custos mais expressivos no cálculo dos custos totais da soldagem são os custos de mão de obra e o custo dos consumíveis utilizados.

Para este trabalho será considerado para o custo total da soldagem (CTS), o custo da mão de obra (CMO) somado ao custo do metal de adição (CMA) e o custo do gás (CG).

O custo da mão de obra foi calculado utilizando o custo do soldador multiplicado pelo tempo utilizado na soldagem do corpo de prova conforme equação 4 [13].

$$\text{CMO (R\$)} = \text{Custo unitário (R\$/min.)} \times \text{Tempo de soldagem (min.)} \quad (4)$$

O custo dos consumíveis foi calculado somando o custo do metal de adição e custo do gás utilizado.

Para o cálculo do custo do metal de adição, deve-se calcular o custo do metal depositado, que é dado pela equação 5 [13].

$$\text{CMD (R\$)} = \text{massa do metal depositado (kg)} \times \text{custo do consumível (R\$/kg)} \quad (5)$$

Massa do metal depositado é calculada pela equação 6 [13].

$$\text{MMD (kg)} = \text{área da seção transversal da junta (cm}^2\text{)} \times \text{comprimento da solda (cm)} \times \text{densidade do material (kg/cm}^3\text{)} \quad (6)$$

A tabela 4.8 representa a densidade aproximada de algumas ligas. O aço carbono foi o material utilizado na soldagem dos corpos de prova.

Tabela 4.8 – Densidade aproximada de algumas ligas [13]

Liga	Densidade (kg/cm ³)
Aço carbono	0,0078
Aço inoxidável	0,0080
Ligas de cobre	0,0086
Ligas de níquel	0,0086
Ligas de alumínio	0,0028
Ligas de titânio	0,0047

Para o cálculo do custo do metal de adição, considera-se a eficiência de deposição, que visa descontar as perdas devido a respingos, pontas descartadas, etc..., a eficiência de deposição varia conforme o processo de

soldagem e seus parâmetros. O cálculo do metal de adição é feito conforme a equação 7 [13].

$$CMA (\text{R\$}) = CMD (\text{R\$}) / ED \text{ (eficiência de deposição)} \quad (7)$$

A tabela 4.9 apresenta alguns valores típicos de eficiência de deposição.

Tabela 4.9 – Valores típicos de eficiência de deposição [13]

Processo	ϕ (%)
SMAW	
Comprimento:	
350mm	55-65
450mm	60-70
SAW	95-99
GMAW	85-97
FCAW	80-90

Como não foram encontrados valores para a eficiência de deposição para o processo TIG, adotou-se a eficiência de 65%, semelhante ao processo Eletrodo Revestido.

O custo do gás de proteção é dado pela equação 8 [13].

$$CG (\text{R\$}) = [\text{vazão do gás (l/min.)} \times \text{tempo de arco aberto (s)} \times \text{custo do gás (R\$/m}^3)] / 60.000 \quad (8)$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.

5.1 ENSAIO POR ULTRA-SOM

O resultado do ensaio por ultra-som foi considerado satisfatório, não foram identificadas descontinuidades que reprovassem nenhum dos 10 corpos de prova inspecionados dos experimentos 01 e 02.

5.2 MACROGRAFIA

5.2.1 PENETRAÇÃO

De acordo com a análise macrográfica, os 05 corpos de prova do experimento 01 e os 05 corpos de prova do experimento 02 tiveram fusão completa dos cordões de solda sendo aprovados conforme o critério da penetração total.

As figuras 5.1 a 5.5 são as macrografias realizadas nos corpos de prova do experimento 01 e as figuras 5.6 a 5.10 são as macrografias realizadas nos corpos de prova do experimento 02.

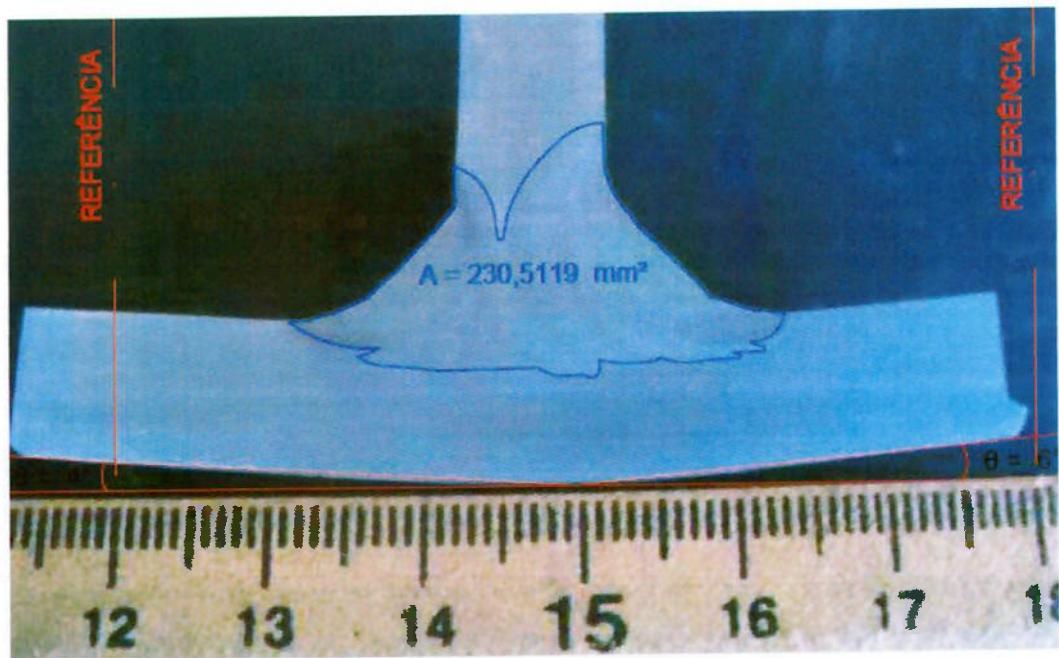


Figura 5.1 – Macrografia do corpo de prova 01, experimento 01.

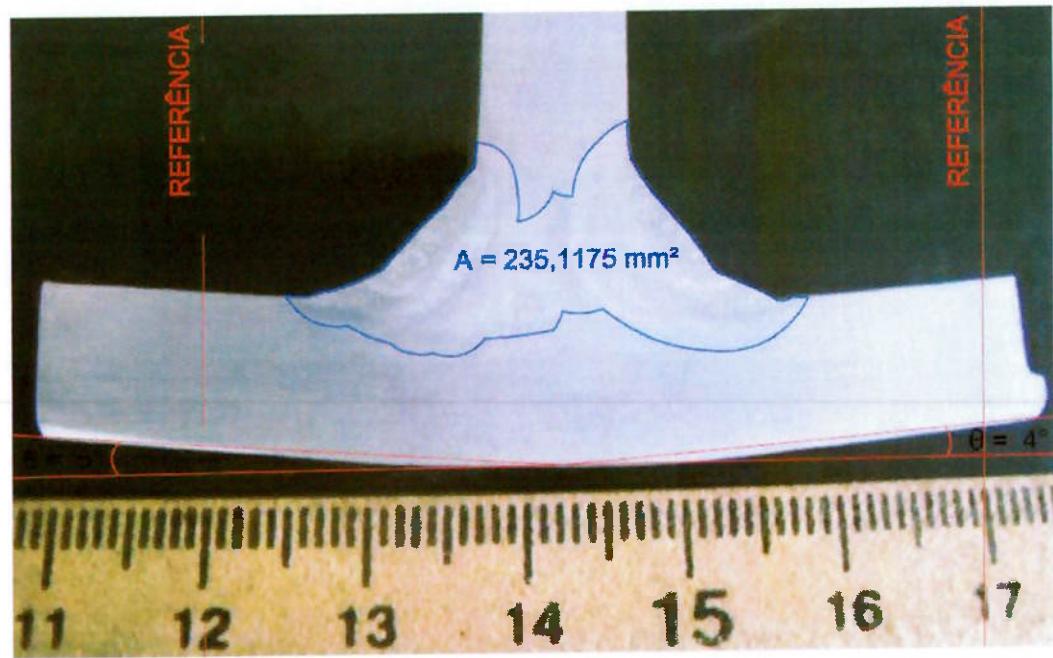


Figura 5.2 – Macrografia do corpo de prova 02, experimento 01.

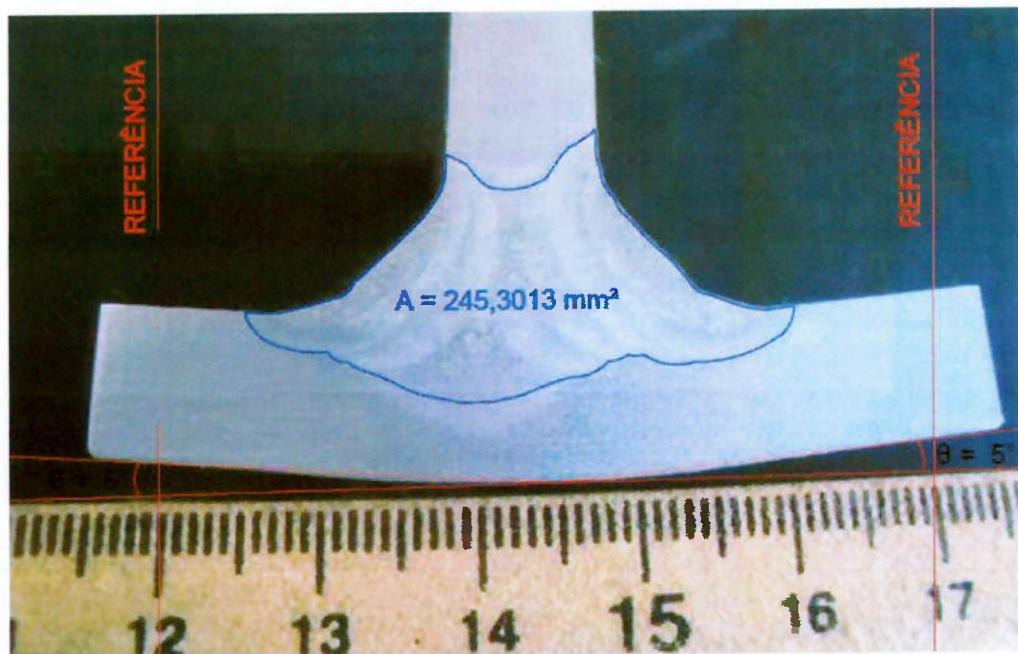


Figura 5.3 – Macrografia do corpo de prova 03, experimento 01.

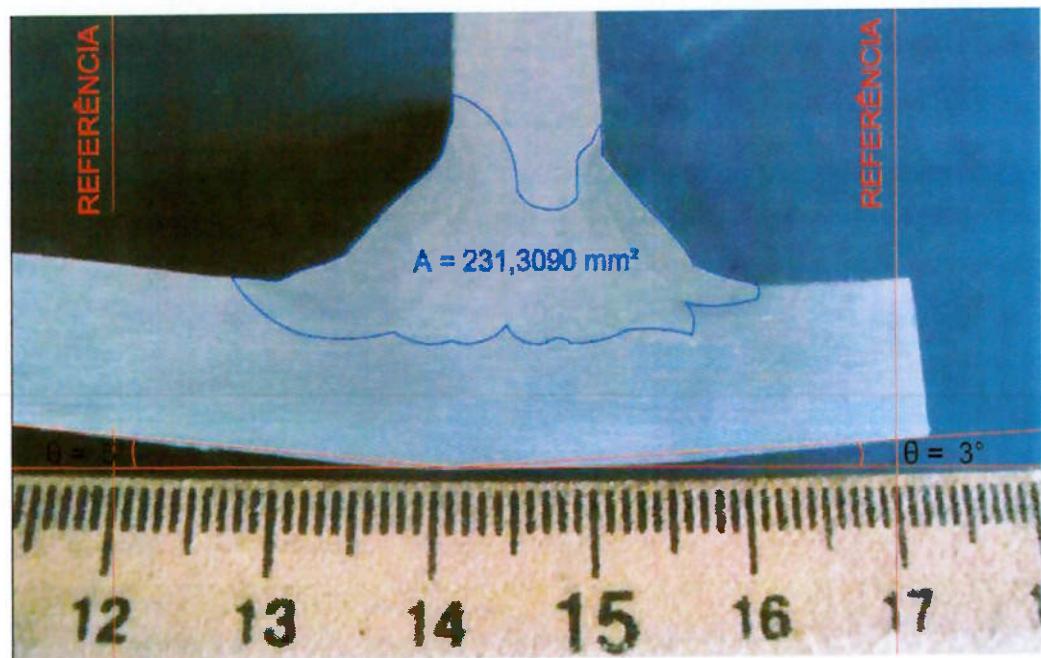


Figura 5.4 – Macrografia do corpo de prova 04, experimento 01.

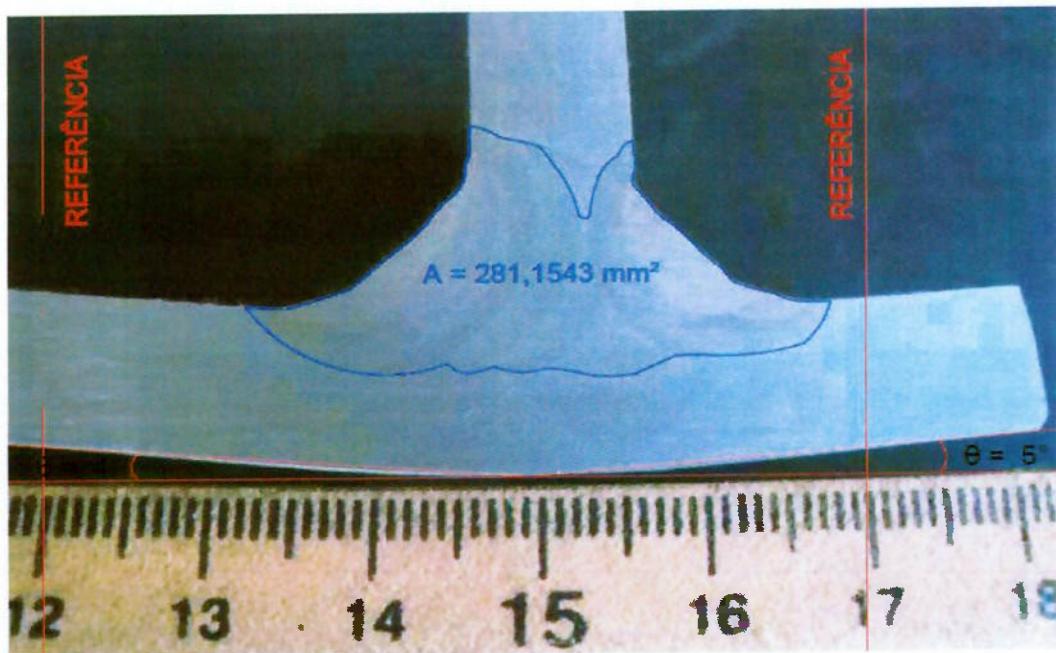


Figura 5.5 – Macrografia do corpo de prova 05, experimento 01.

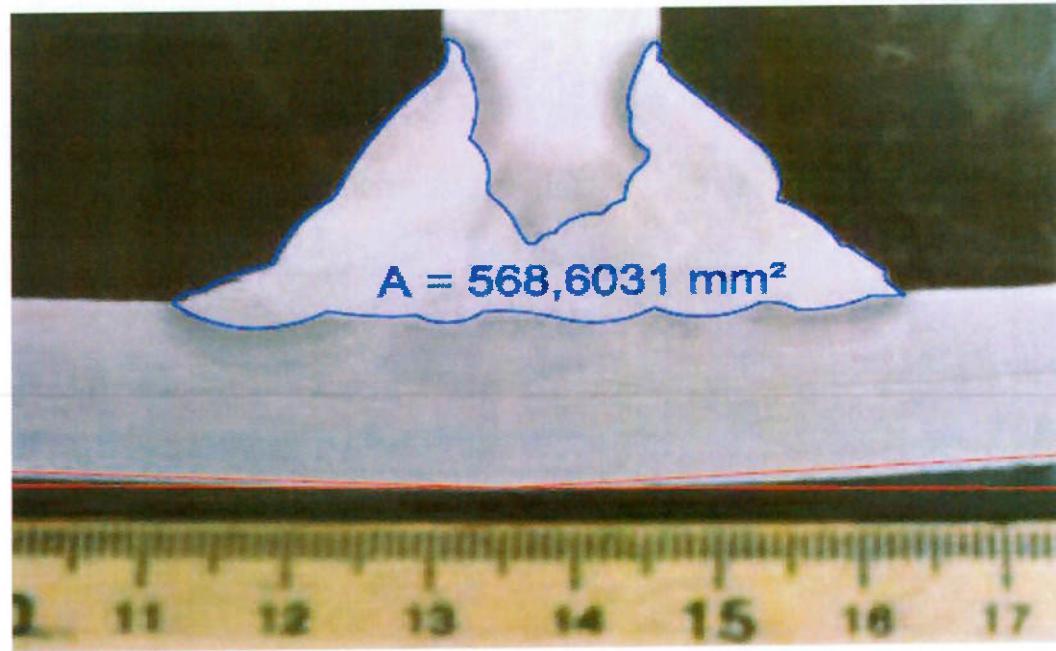


Figura 5.6 – Macrografia do corpo de prova 01, experimento 02.

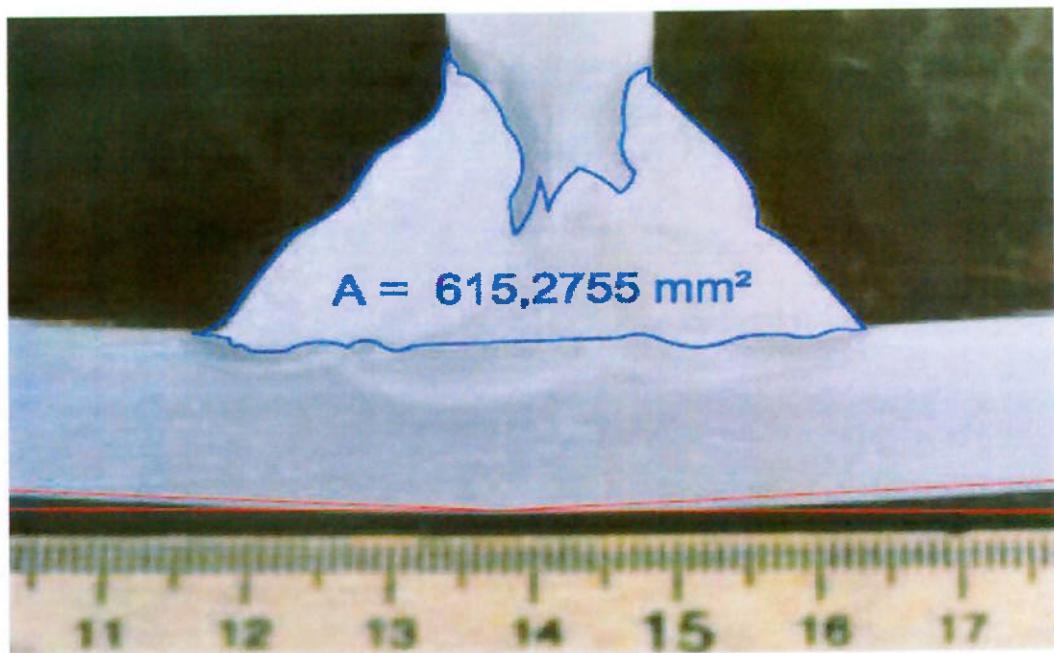


Figura 5.7 – Macrografia do corpo de prova 02, experimento 02.

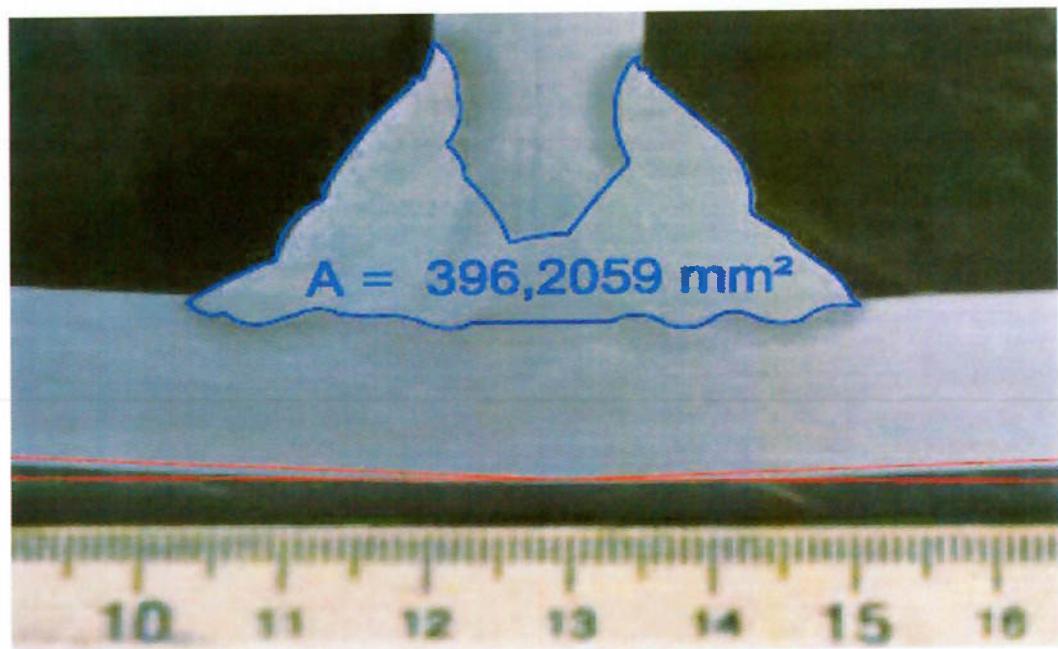


Figura 5.8 – Macrografia do corpo de prova 03, experimento 02.

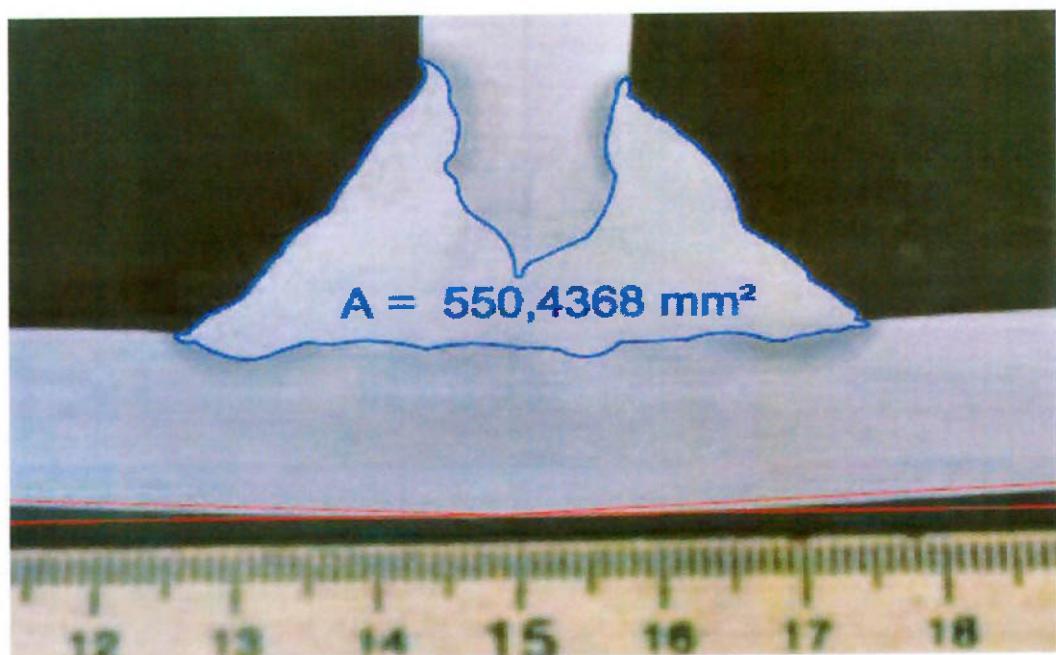


Figura 5.9 – Macrografia do corpo de prova 04, experimento 02.

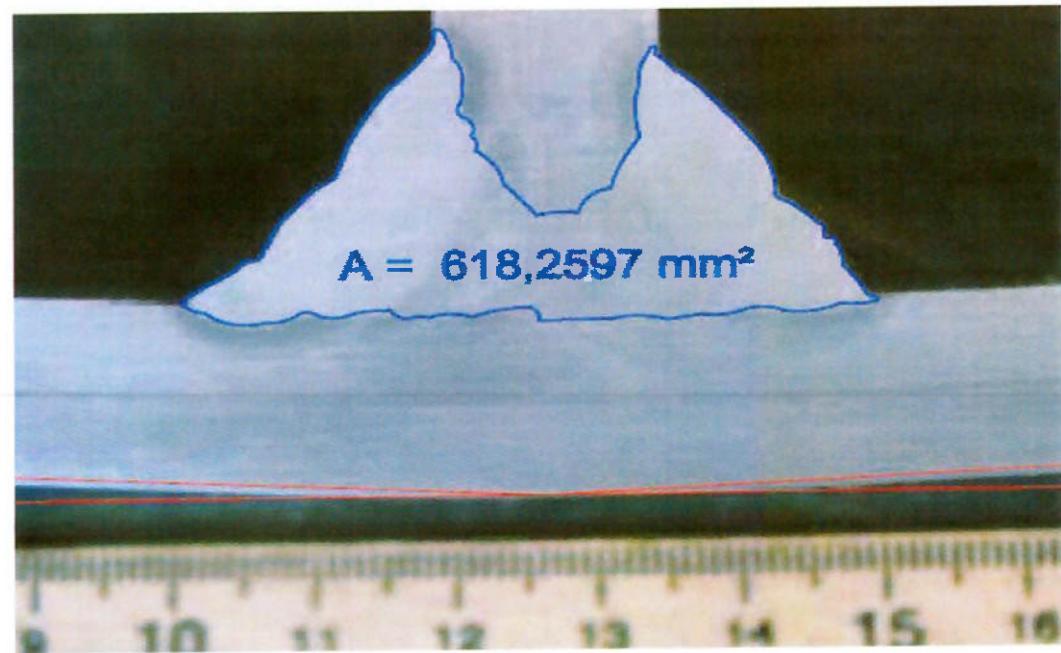


Figura 5.10 – Macrografia do corpo de prova 05, experimento 02.

Um dos principais objetivos deste trabalho foi avaliar a penetração da solda utilizando a técnica da dupla fusão na raiz das soldas com o processo de soldagem arame tubular, pois, o processo usual para a soldagem dos tanques é o TIG utilizando a técnica da dupla fusão.

Inicialmente foram feito experimentos utilizando-se uma corrente de 240 amperes e velocidade de soldagem de 34 centímetros por minuto. Com estes parâmetros de soldagem, ao cortar os corpos de prova, visivelmente observou-se que a solda não penetrou por completo conforme demonstrado na figura 5.1.

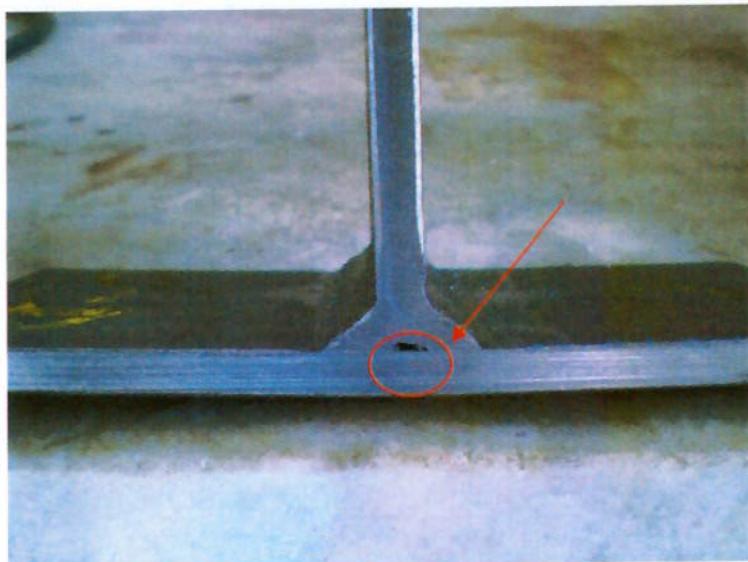


Figura 5.11 - Representação do corpo de prova sem penetração total

Foram realizados diversos testes alternando a corrente, assim como, instruindo os soldadores quanto e a necessidade de diminuir a velocidade de soldagem e o correto posicionamento do bocal da tocha buscando obter a penetração total na raiz.

Ao aumentar a corrente da máquina para 260 amperes, observou-se que apesar desta corrente ser normalmente utilizada para soldagem no processo arame tubular, quando se utiliza a técnica da dupla fusão com esta corrente, o visual da solda ficou muito irregular e geraram-se muitos respingos durante a soldagem.

Finalmente, após os ajustes dos parâmetros de soldagem demostrados nas tabelas 5.5 a 5.14 e treinamento dos soldadores, tanto os corpos de prova soldados no processo TIG como no arame tubular apresentaram penetração total.

5.2.2 ÁREA DOS CORDÕES DE SOLDADURA

As tabelas 5.1 e 5.2 representam as áreas dos cordões de solda dos corpos de prova dos experimentos 01 e 02 calculadas conforme representado na figura 4.6.

Tabela 5.1 – Área do cordão de solda por corpo de prova, experimento 01

Experimento	Amostra	Área do Cordão de Solda (mm ²) - Exp - 01
01 - TIG	1	230,51
	2	235,12
	3	245,13
	4	231,31
	5	281,15
Média - Exp. 01		244,64
Desvio Padrão - Exp. 01		21,22

Tabela 5.2 – Área do cordão de solda por corpo de prova, experimento 02

Experimento	Amostra	Área do Cordão de Solda (mm ²) - Exp - 02
02 - AT	1	568,6
	2	615,27
	3	396,21
	4	550,44
	5	618,26
Média - Exp. 02		549,76
Desvio Padrão - Exp. 01		90,71

Para melhor ilustrar a comparação entre as áreas dos cordões de solda medidos no experimento 01 e experimento 02 representados nas tabelas 5.1 e 5.2, foi feito o gráfico mostrado na figura 5.12, sendo que no eixo "Y" são os valor das áreas dos cordões de solda medido em milímetros quadrados e no eixo "X" a identificação das amostras.

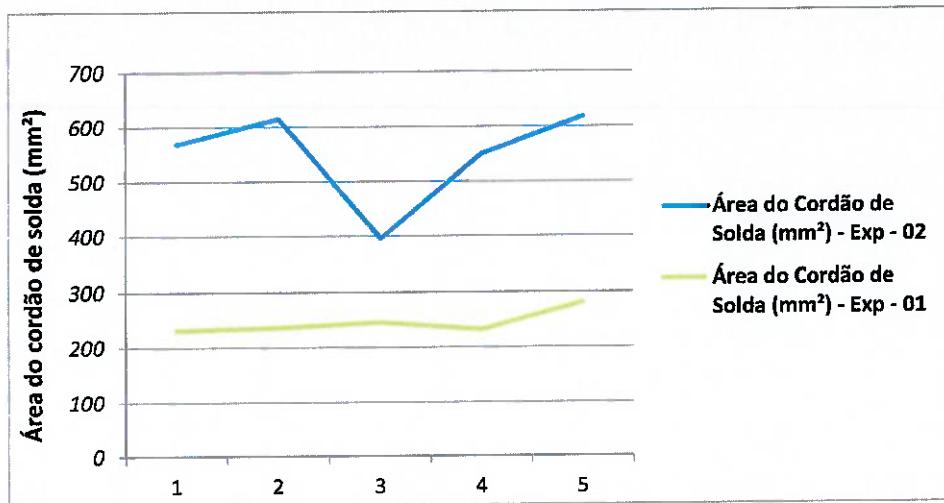


Figura 5.12 – Comparação das áreas dos cordões de solda dos experimentos 01 e 02

O gráfico da figura 5.13 representa um comparativo entre a média e desvio padrão das áreas dos cordões de solda medidas nos experimentos 01 e 02.

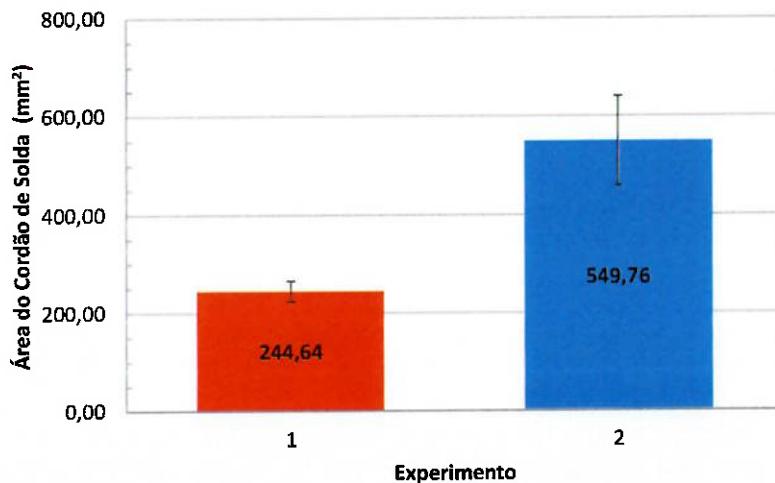


Figura 5.13 – Comparação das médias das áreas dos cordões de solda dos experimentos 01 e 02

A área de solda medida nas macrografias dos corpos de prova soldados no experimento 02 apresentou valor médio aproximado de 2 vezes maior que nos corpos de prova soldados no experimento 01. Este resultado era esperado, pois, a taxa de deposição no processo de soldagem arame tubular é maior em relação ao processo TIG.

A eficiência de transmissão para o processo de soldagem arame tubular é 0,85 enquanto que a eficiência de transmissão para o processo de soldagem TIG é 0,40. Comparando, a eficiência de transmissão no processo Arame Tubular é 212,5% maior que a eficiência no processo TIG e a área de soldagem no processo Arame Tubular foi 225% maior que no processo TIG.

5.2.3 ÂNGULO DE DEFORMAÇÃO

As tabelas 5.3 e 5.4 representam o ângulo de formação obtido pelas macrografias conforme representado na figura 4.6 e a energia de soldagem calculada em função dos parâmetros de soldagem registrados nas tabelas 5.5 a 5.14.

Tabela 5.3 – Ângulo de deformação e energia de soldagem por corpo de prova experimento 01

Experimento	Amostra	Ângulo de deformação LE (°)	Ângulo de deformação LD (°)	Média da deformação Exp. 01 (°)	Desvio Padrão da deformação Exp. 01 (°)	Energia de soldagem média Exp. 01 (kJ/cm)
01 - TIG	1	4	6	5	1,4	7,26
	2	5	4	4,5	0,7	7,33
	3	5	5	5	0,0	7,66
	4	5	3	4	1,4	7,37
	5	4	5	4,5	0,7	8,11
Médias - Exp. 01		-		4,6	0,6	7,55

Tabela 5.4 – Ângulo de deformação e energia de soldagem por corpo de prova experimento 02

Experimento	Amostra	Ângulo de deformação LE (°)	Ângulo de deformação LD (°)	Média da deformação Exp. 02 (°)	Desvio Padrão da deformação Exp. 02 (°)	Energia de soldagem média Exp. 02 (kJ/cm)
02 - AT	1	2	4	3	1,4	9,06
	2	3	4	3,5	0,7	9,11
	3	3	3	3	0,0	8,95
	4	3	3	3	0,0	9,03
	5	3	3	3	0,0	9,16
Médias - Exp. 02		-		3,1	0,6	9,06

Para melhor ilustrar a comparação entre as deformações medidas no experimento 01 e experimento 02 representados nas tabelas 5.3 e 5.4, foi feito o gráfico mostrado na figura 5.14 e 5.15, sendo que no eixo "Y" no lado esquerdo do gráfico são os valores das energias de soldagem e no lado direito os valores da deformação média por amostra. No eixo "X" está a identificação das amostras.

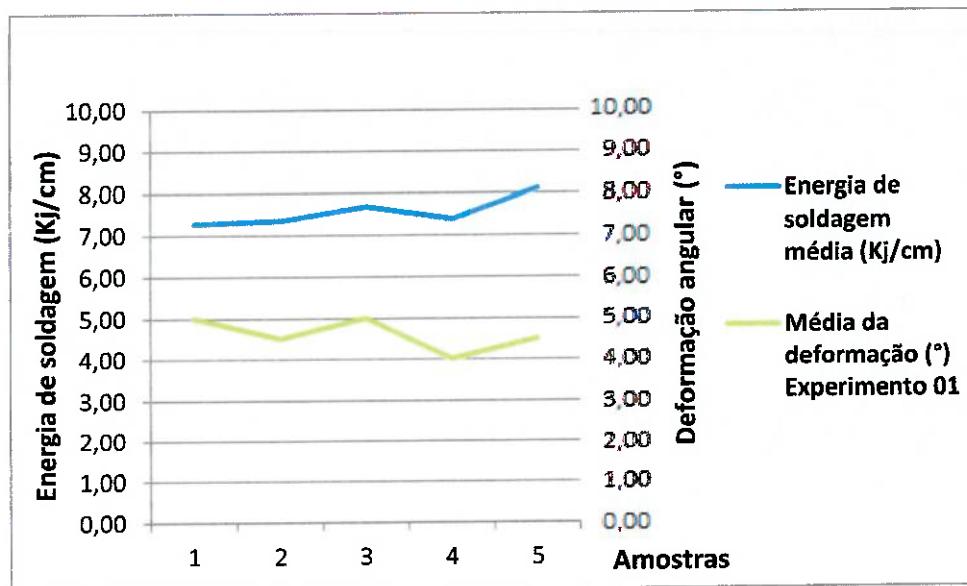


Figura 5.14 – Comparação das deformações em função da energia de soldagem do experimento 01

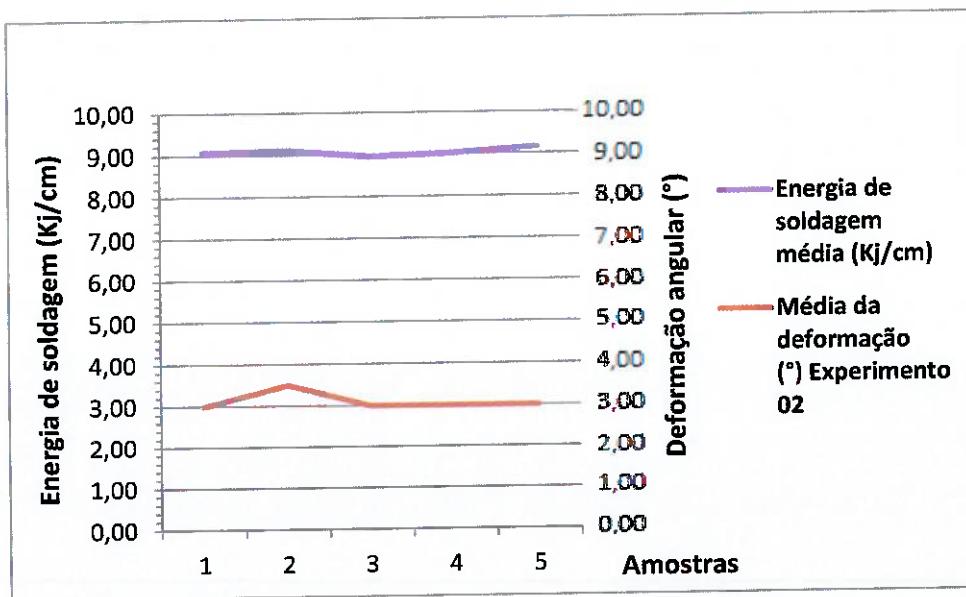


Figura 5.15 – Comparação das deformações em função da energia de soldagem do experimento 02

O gráfico da figura 5.16 representa um comparativo entre a média e desvio padrão das deformações medidas nos experimentos 01 e 02.

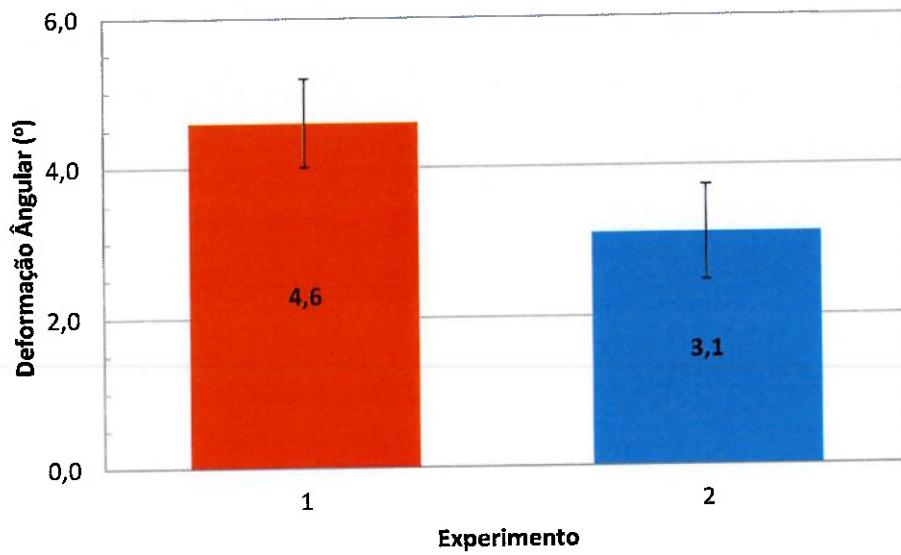


Figura 5.16 – Comparação das médias das deformações medidas nos experimentos 01 e 02

O ângulo de deformação medido nas macrografias dos corpos de prova soldados no experimento 01 apresentou um valor de 48% maior que nos corpos de prova soldados no experimento 02.

Com relação à energia de soldagem, apesar da tensão e corrente serem consideravelmente maior no processo arame tubular (experimento 02) em relação ao processo TIG (experimento 01), o valor da energia de soldagem no processo arame tubular foi de apenas 20% maior em relação ao processo TIG.

Apesar da tensão do arco, a corrente de soldagem e a eficiência de soldagem serem maiores no processo arame tubular, a deformação angular no processo TIG foi maior devido velocidade de soldagem arame tubular ter sido 5 vezes maior que no processo TIG. A velocidade de soldagem influencia diretamente no tamanho das isotermas o que explica porque a deformação no processo TIG foi maior que no processo arame tubular.

5.3 CUSTOS DA SOLDAGEM ENTRE OS EXPERIMENTOS

5.3.1 TEMPO DA SOLDAGEM

O tempo registrado para soldagem de cada passe de solda, por corpo de prova, está registrado nas tabelas 5.5 a 5.14.

Tabela 5.5 – Parâmetros de soldagem experimento 01, corpo de prova 01

Processo de Soldagem	Corpo de Prova	Vazão (l/min)	Passes	Corrente média (A)	Tensão média (V)	Velocidade (cm/min)	Velocidade (cm/s)	Energia de Soldagem (kJ/cm)	Tempo Soldagem por CP	Tempo Soldagem por CP (min.)
TIG	CP1	9	1	120	18	7	0,12	7,41	14'1''	14,02
				120	18	6,7	0,11	7,74	14'5''	14,09
			2	140	19	9	0,15	7,09	11'0''	11,01
			2	140	19	9	0,15	7,09	11'0''	11,01
			3	140	19	8	0,13	7,98	12'3''	12,05
			3	140	19	9	0,15	7,09	11'0''	11,01
			4	150	20	11	0,18	6,55	9'5''	9,09
			4	150	20	10	0,17	7,20	10'0''	10,00
			5	150	20	10	0,17	7,20	10'0''	10,00
			5	150	20	9	0,15	8,00	11'0''	11,01
			6	125	17	7	0,12	7,29	14'1''	14,02
			6	125	17	7	0,12	7,29	14'1''	14,02
			7	125	17	8	0,13	6,38	12'3''	12,05
			7	125	17	7	0,12	7,29	14'1''	14,02

Tabela 5.6 – Parâmetros de soldagem experimento 01, corpo de prova 02

Processo de Soldagem	Corpo de Prova	Vazão (l/min)	Passes	Corrente média (A)	Tensão média (V)	Velocidade (cm/min)	Velocidade (cm/s)	Energia de Soldagem (kJ/cm)	Tempo Soldagem por CP	Tempo Soldagem por CP (min.)
TIG	CP2	9	1	120	18	7	0,12	7,41	14'1''	14,02
				120	18	7	0,12	7,41	14'1''	14,02
			2	140	19	9	0,15	7,09	11'0''	11,01
			2	140	19	8	0,13	7,98	12'3''	12,05
			3	140	19	9	0,15	7,09	11'0''	11,01
			3	140	19	8	0,13	7,98	12'3''	12,05
			4	150	20	10	0,17	7,20	10'0''	10,00
			4	150	20	9	0,15	8,00	11'0''	11,01
			5	150	20	10	0,17	7,20	10'0''	10,00
			5	150	20	9	0,15	8,00	11'0''	11,01
			6	125	17	8	0,13	6,38	12'3''	12,05
			6	125	17	7	0,12	7,29	14'1''	14,02
			7	125	17	8	0,13	6,38	12'3''	12,05
			7	125	17	7	0,12	7,29	14'1''	14,02

Tabela 5.7 – Parâmetros de soldagem experimento 01, corpo de prova 03

Processo de Soldagem	Corpo de Prova	Vazão (l/min)	Passes	Corrente média (A)	Tensão média (V)	Velocidade (cm/min)	Velocidade (cm/s)	Energia de Soldagem (kJ/cm)	Tempo Soldagem por CP	Tempo Soldagem por CP (min.)
TIG	CP3	9	1	120	18	7	0,12	7,41	14'1``	14,02
				120	18	6,8	0,11	7,62	14'4``	14,07
			2	140	19	9	0,15	7,09	11'0``	11,01
			2	140	19	8	0,13	7,98	12'3``	12,05
			3	140	19	8	0,13	7,98	12'3``	12,05
			3	140	19	8	0,13	7,98	12'3``	12,05
			4	150	20	9	0,15	8,00	11'0``	11,01
			4	150	20	8	0,13	9,00	12'3``	12,05
			5	150	20	9	0,15	8,00	11'0``	11,00
			5	150	20	9	0,15	8,00	11'0``	11,01
			6	125	17	7	0,12	7,29	14'1``	14,02
			6	125	17	7	0,12	7,29	14'1``	14,02
			7	125	17	8	0,13	6,38	12'3``	12,05
			7	125	17	7	0,12	7,29	14'1``	14,02

Tabela 5.8 – Parâmetros de soldagem experimento 01, corpo de prova 04

Processo de Soldagem	Corpo de Prova	Vazão (l/min)	Passes	Corrente média (A)	Tensão média (V)	Velocidade (cm/min)	Velocidade (cm/s)	Energia de Soldagem (kJ/cm)	Tempo Soldagem por CP	Tempo Soldagem por CP (min.)
TIG	CP4	9	1	120	18	7	0,12	7,41	14'1``	14,02
				120	18	6	0,1	8,64	16'3``	16,06
			2	140	19	9	0,15	7,09	11'0``	11,01
			2	140	19	9	0,15	7,09	11'0``	11,01
			3	140	19	8	0,13	7,98	12'3``	12,05
			3	140	19	9	0,15	7,09	11'0``	11,01
			4	150	20	10	0,17	7,20	10'0``	10,00
			4	150	20	10	0,17	7,20	10'0``	10,00
			5	150	20	10	0,17	7,20	10'0``	10,00
			5	150	20	9	0,15	8,00	11'0``	11,01
			6	125	17	7	0,12	7,29	14'1``	14,02
			6	125	17	7	0,12	7,29	14'1``	14,02
			7	125	17	8	0,13	6,38	12'3``	12,05
			7	125	17	7	0,12	7,29	14'1``	14,02

Tabela 5.9 – Parâmetros de soldagem experimento 01, corpo de prova 05

Processo de Soldagem	Corpo de Prova	Vazão (l/min)	Passes	Corrente média (A)	Tensão média (V)	Velocidade (cm/min)	Velocidade (cm/s)	Energia de Soldagem (kJ/cm)	Tempo Soldagem por CP	Tempo Soldagem por CP (min.)
TIG	CP5	9	1	120	18	7	0,12	7,41	14'1``	14,02
				120	18	6	0,1	8,64	16'3``	16,06
			2	140	19	8	0,13	7,98	12'3``	12,05
			2	140	19	7	0,12	9,12	14'1``	14,02
			3	140	19	8	0,13	7,98	12'3``	12,05
			3	140	19	8	0,13	7,98	12'3``	12,05
			4	150	20	9	0,15	8,00	11'0``	11,01
			4	150	20	8	0,13	9,00	12'3``	12,05
			5	150	20	9	0,15	8,00	11'0,``	11,01
			5	150	20	7	0,12	10,29	14'1``	14,02
			6	125	17	7	0,12	7,29	14'1``	14,02
			6	125	17	7	0,12	7,29	14'1``	14,02
			7	125	17	7	0,12	7,29	14'1``	14,02
			7	125	17	7	0,12	7,29	14'1``	14,02

Tabela 5.10 – Parâmetros de soldagem experimento 02, corpo de prova 01

Processo de Soldagem	Corpo de Prova	Vazão (l/min)	Passes	Corrente média (A)	Tensão média (V)	Velocidade (cm/min)	Velocidade (cm/s)	Energia de Soldagem (kJ/cm)	Tempo Soldagem por CP	Tempo Soldagem por CP (min.)
AT	CP1	19	1	250	20	27	0,45	9,44	3'42``	3,70
				250	20	26	0,43	9,81	3'50``	3,84
			2	300	25	34	0,57	11,25	2'56``	2,94
			2	300	25	34	0,57	11,25	2'56``	2,94
			3	300	25	45	0,75	8,5	2'13``	2,22
			3	300	25	47	0,78	8,14	2'7``	2,12
			4	300	25	51	0,85	7,50	1'57``	1,96
			4	300	25	50	0,83	7,65	2'1``	2,02
			5	300	25	46	0,77	8,32	2'10``	2,17
			5	300	25	46	0,77	8,32	2'10``	2,17
			6	280	22	35	0,58	8,98	2'51``	2,85
			6	280	22	34	0,57	9,24	2'56``	2,94
			7	280	22	34	0,57	9,24	2'56``	2,94
			7	280	22	34	0,57	9,24	2'56``	2,94

Tabela 5.11 – Parâmetros de soldagem experimento 02, corpo de prova 02

Processo de Soldagem	Corpo de Prova	Vazão (l/min)	Passes	Corrente média (A)	Tensão média (V)	Velocidade (cm/min)	Velocidade (cm/s)	Energia de Soldagem (kJ/cm)	Tempo Soldagem por CP	Tempo Soldagem por CP (min.)
AT	CP2	19	1	250	20	27	0,45	9,44	3'42``	3,70
				250	20	26	0,43	9,81	3'50``	3,84
			2	300	25	34	0,57	11,25	2'56``	2,94
			2	300	25	34	0,57	11,25	2'56``	2,94
			3	300	25	45	0,75	8,5	2'13``	2,22
			3	300	25	45	0,75	8,50	2'1``	2,22
			4	300	25	49	0,82	7,81	2'2``	2,04
			4	300	25	50	0,83	7,65	2'1``	2,02
			5	300	25	46	0,77	8,32	2'10``	2,17
			5	300	25	46	0,77	8,32	2'10``	2,17
			6	280	22	35	0,58	8,98	2'51``	2,85
			6	280	22	34	0,57	9,24	2'56``	2,94
			7	280	22	34	0,57	9,24	2'56``	2,94
			7	280	22	34	0,57	9,24	2'56``	2,94

Tabela 5.12 – Parâmetros de soldagem experimento 02, corpo de prova 03

Processo de Soldagem	Corpo de Prova	Vazão (l/min)	Passes	Corrente média (A)	Tensão média (V)	Velocidade (cm/min)	Velocidade (cm/s)	Energia de Soldagem (kJ/cm)	Tempo Soldagem por CP	Tempo Soldagem por CP (min.)
AT	CP3	19	1	250	20	27	0,45	9,44	3'42``	3,70
				250	20	26	0,43	9,81	3'50``	3,84
			2	300	25	35	0,58	10,93	2'51``	2,85
			2	300	25	35	0,58	10,93	2'51``	2,85
			3	300	25	45	0,75	8,5	2'13``	2,22
			3	300	25	47	0,78	8,14	2'7``	2,12
			4	300	25	52	0,87	7,36	1'55``	1,92
			4	300	25	52	0,87	7,36	1'55``	1,92
			5	300	25	47	0,78	8,14	2'7``	2,12
			5	300	25	46	0,77	8,32	2'10``	2,17
			6	280	22	35	0,58	8,98	2'51``	2,85
			6	280	22	35	0,58	8,976	2'51``	2,85
			7	280	22	34	0,57	9,24	2'56``	2,94
			7	280	22	34	0,57	9,24	2'56``	2,94

Tabela 5.13 – Parâmetros de soldagem experimento 02, corpo de prova 04

Processo de Soldagem	Corpo de Prova	Vazão (l/min)	Passes	Corrente média (A)	Tensão média (V)	Velocidade (cm/min)	Velocidade (cm/s)	Energia de Soldagem (kJ/cm)	Tempo Soldagem por CP	Tempo Soldagem por CP (min.)
AT	CP4	19	1	250	20	27	0,45	9,44	3'42''	3,70
				250	20	26	0,43	9,81	3'50''	3,84
			2	300	25	35	0,58	10,93	2'51''	2,85
			2	300	25	34	0,57	11,25	2'56''	2,94
			3	300	25	45	0,75	8,5	2'13''	2,22
			3	300	25	46	0,77	8,32	2'1''	2,17
			4	300	25	52	0,87	7,36	1'55''	1,92
			4	300	25	52	0,87	7,36	1'55''	1,92
			5	300	25	47	0,78	8,14	2'7''	2,12
			5	300	25	46	0,77	8,32	2'10''	2,17
			6	280	22	35	0,58	8,98	2'51''	2,85
			6	280	22	34	0,57	9,24	2'56''	2,94
			7	280	22	33	0,55	9,52	3'1''	3,03
			7	280	22	34	0,57	9,24	2'56''	2,94

Tabela 5.14 – Parâmetros de soldagem experimento 02, corpo de prova 05

Processo de Soldagem	Corpo de Prova	Vazão (l/min)	Passes	Corrente média (A)	Tensão média (V)	Velocidade (cm/min)	Velocidade (cm/s)	Energia de Soldagem (kJ/cm)	Tempo Soldagem por CP	Tempo Soldagem por CP (min.)
AT	CP5	19	1	250	20	27	0,45	9,44	3'42''	3,70
				250	20	26	0,43	9,81	3'50''	3,84
			2	300	25	34	0,57	11,25	2'56''	2,94
			2	300	25	34	0,57	11,25	2'56''	2,94
			3	300	25	45	0,75	8,5	2'13''	2,22
			3	300	25	45	0,75	8,50	2'1''	2,22
			4	300	25	50	0,83	7,65	2'1''	2,02
			4	300	25	50	0,83	7,65	2'1''	2,02
			5	300	25	46	0,77	8,32	2'10''	2,17
			5	300	25	46	0,77	8,32	2'10''	2,17
			6	280	22	33	0,55	9,52	3'1''	3,03
			6	280	22	34	0,57	9,24	2'56''	2,94
			7	280	22	33	0,55	9,52	3'1''	3,03
			7	280	22	34	0,57	9,24	2'56''	2,94

Com o objetivo de facilitar a visualização, foi somado o tempo de soldagem em cada passe obtendo-se o tempo de soldagem por corpo de prova e por processo conforme apresentado nas tabelas 5.15 e 5.16.

Tabela 5.15 – Tempo médio de soldagem por corpo de prova, experimento 01

Experimento	Amostra	Tempo de Soldagem por CP Exp. 01 (min.)
01 - TIG	1	167,40
	2	168,32
	3	174,43
	4	170,28
	5	184,42
Média - Exp. 01		172,97
Desvio Padrão - Exp. 01		6,95

Tabela 5.16 – Tempo médio de soldagem por corpo de prova, experimento 02

Experimento	Amostra	Tempo de Soldagem por CP Exp. 02 (min.)
02 - AT	1	37,75
	2	37,93
	3	37,29
	4	37,61
	5	38,18
Média - Exp. 02		37,75
Desvio Padrão - Exp. 02		0,33

Para melhor ilustrar a comparação entre os tempos de soldagem por corpo de prova medidos no experimento 01 e experimento 02 representados nas tabelas 5.15 e 5.16, foi feito o gráfico mostrado na figura 5.17, sendo que no eixo "Y" são os valores dos tempos de soldagem por corpo de prova medido em minutos e no eixo "X" a identificação das amostras.

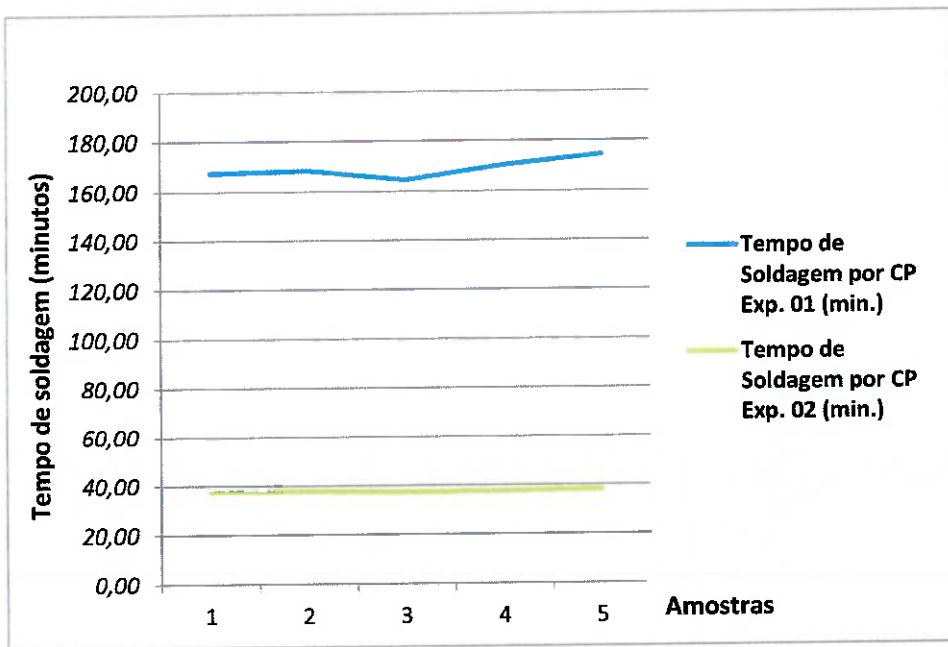


Figura 5.17 – Comparação dos tempos de soldagem por corpo de prova dos experimentos 01 e 02

O gráfico da figura 5.18 representa um comparativo entre a média e desvio padrão dos tempos de soldagem por corpo de prova medido nos experimentos 01 e 02.

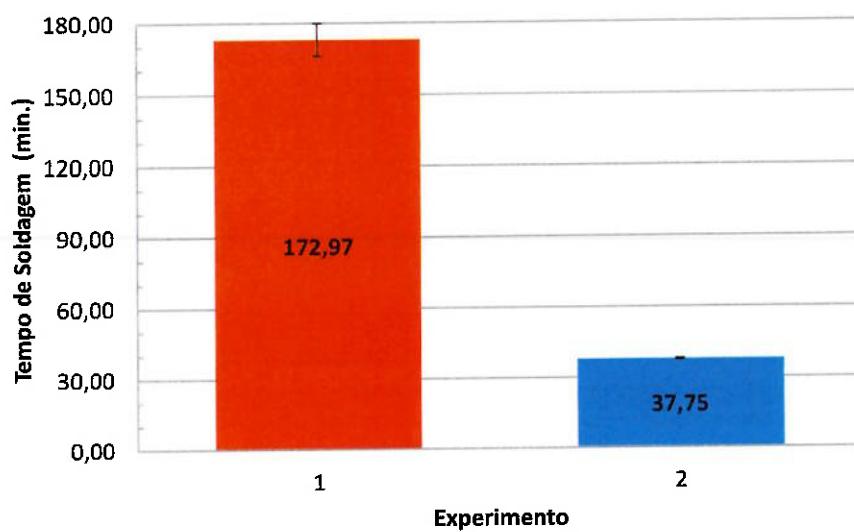


Figura 5.18 – Comparação das médias dos tempos de soldagem medida nos experimentos 01 e 02

Observando-se as tabelas 5.15 e 5.16, com relação à média do tempo de soldagem, o processo arame tubular apresentou um resultado aproximado de 5 vezes menor com relação ao processo TIG. Este resultado era esperado devido ao fato do processo de soldagem arame tubular trabalhar com energia de soldagem maior aumentando a velocidade na deposição do metal de adição. Também é importante considerar que no processo arame tubular, a alimentação do metal de adição é contínua não havendo necessidade de interrupção para troca da vareta como ocorre no processo TIG.

5.3.2 CUSTOS DA SOLDAGEM

O método utilizado no cálculo dos custos da soldagem está descrito no item 4.3.3.

Com o objetivo de não expor os custos da empresa onde foram realizados os experimentos, os valores em reais (R\$) foram convertidos em unidades monetárias (UM) a partir custo da mão de obra e desta forma projetando-o para os demais custos. Na tabela 5.17 estão indicados os custos em unidades monetárias (UM).

Tabela 5.17 – Custos em unidades monetárias (UM)

Descrição do custo	Valor
Custo de MO (UM/min.)	10,00
Custo do consumível TIG (UM/kg)	52,10
Custo do consumível Arame Tubular (UM/kg)	44,79
Custo do gás argônio - TIG (UM/m ³)	47,90
Custo do gás dióxido de carbono - Arame Tbular (UM/m ³)	19,82

Portanto, nas tabelas a seguir será possível visualizar proporcionalmente o custo calculado nos experimentos e fazer comparações de forma real, porém, sem expor comercialmente a empresa.

5.3.2.1 CUSTO DA MÃO DE OBRA

A tabela 5.18 e 5.19 representam os valores utilizados no cálculo do custo de mão de obra e o custo da mão de obra (CMO) para os experimentos 01 e 02.

Tabela 5.18 – Cálculo do custo de mão de obra por corpo de prova experimento 01

CÁLCULO DO CMO (custo de mão de obra)				
Experimento	Amostra	Tempo de Soldagem por CP (min.)	Custo de MO (UM/min.)	CMO por CP Exp. 01 (UM)
Exp. 01 - TIG	1	167,40	10,00	1674,00
	2	168,32	10,00	1683,20
	3	174,43	10,00	1744,30
	4	170,28	10,00	1702,80
	5	184,42	10,00	1844,20
Média CMO - Exp. 01				1729,70
Desvio Padrão CMO - Exp. 01				69,5

Tabela 5.19 – Cálculo do custo de mão de obra por corpo de prova experimento 02

CÁLCULO DO CMO (custo de mão de obra)				
Experimento	Amostra	Tempo de Soldagem por CP (min.)	Custo de MO (UM/min.)	CMO por CP Exp. 02 (UM)
Exp. 02 - AT	1	37,75	10,00	377,50
	2	37,93	10,00	379,30
	3	37,29	10,00	372,90
	4	37,61	10,00	376,10
	5	38,18	10,00	381,80
Média CMO - Exp. 02				377,52
Desvio Padrão CMO - Exp. 02				3,3

O custo do soldador para o processo arame tubular foi considerado o mesmo que o custo do soldador que soldou os corpos de prova no processo TIG devido ambos os soldadores estarem no mesmo nível de experiência e qualificação.

Para melhor ilustrar a comparação entre os custos de mão de obra calculados no experimento 01 e experimento 02 representados nas tabelas 5.18 e 5.19, foi feito o gráfico mostrado na figura 5.19, sendo que no eixo "Y" são os valores dos custos de mão de obra medidos por corpo de prova e no eixo "X" a identificação das amostras.

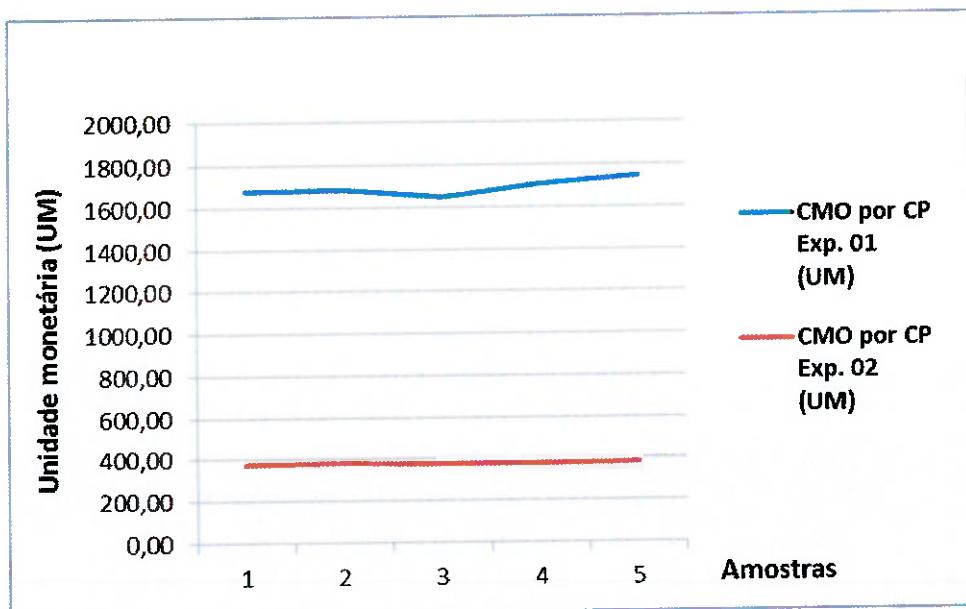


Figura 5.19 – Comparação dos custos de mão de obra por corpo de prova dos experimentos 01 e 02

O gráfico da figura 5.20 representa um comparativo entre a média e desvio padrão das deformações medidas nos experimentos 01 e 02.

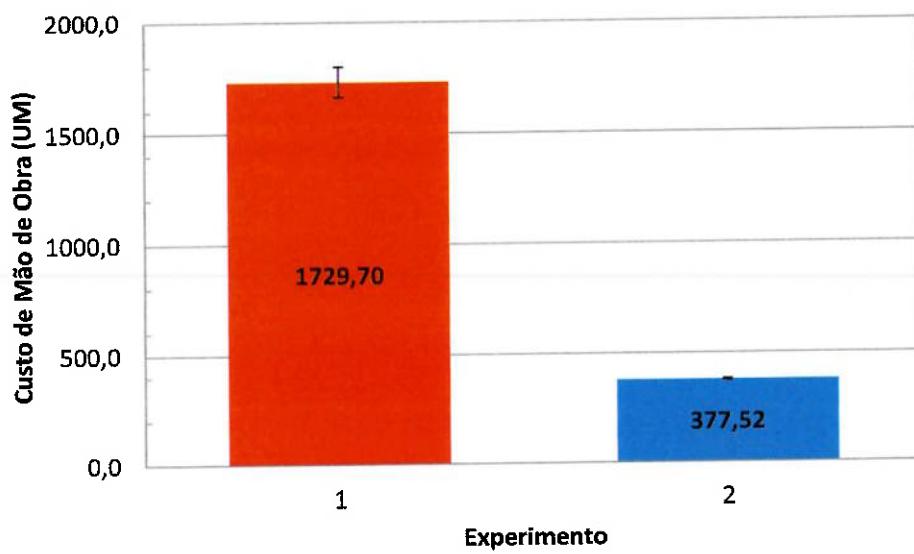


Figura 5.20 – Comparação das médias dos custos de mão de obra dos experimentos 01 e 02

Observa-se uma grande diferença dos custos de mão de obra do experimento 01 em relação ao experimento 02, pois, conforme pode se observar nas tabelas 5.18 e 5.19, os tempos para soldagem, que é o fator de maior influência no custo da mão de obra, no experimento 01 são expressivamente maiores em relação ao experimento 02. Pode-se observar esta diferença de forma bem clara no gráfico da figura 5.17.

5.3.2.2 CUSTO DO METAL DE ADIÇÃO

As tabelas 5.20 e 5.21 representam os valores utilizados no cálculo do custo do metal de adição (CMA) para os experimentos 01 e 02.

Tabela 5.20 – Cálculo do custo do metal de adição por corpo de prova do experimento 01

		CÁLCULO DO MMD (massa de material depositado)				Cálculo do CMD (custo do material depositado)		Cálculo do CMA (custo do metal de adição)	
Experimento	Amostra	Área de Solda (cm ²)	Comprimento do cordão de solda (cm)	Densidade (kg/cm ³)	MMD (kg)	Custo do consumível (UM/kg)	CMD (UM)	Eficiência de Deposição (%)	CMA Exp. 01 (UM)
Exp. 01 - TIG	1	2,31	100,00	0,0078	1,80	52,10	93,67	0,65	144,10
	2	2,35	100,00	0,0078	1,83	52,10	95,54	0,65	146,99
	3	2,45	100,00	0,0078	1,91	52,10	99,61	0,65	153,24
	4	2,31	100,00	0,0078	1,80	52,10	93,99	0,65	144,60
	5	2,81	100,00	0,0078	2,19	52,10	114,24	0,65	175,76
MÉDIA				Média MMD Exp. 01	1,91	Média CMD Exp. 01	99,41	Média CMA Exp. 01	152,94
DESVIO PADRÃO				Desvio Padrão MMD Exp. 01	0,2	Desvio Padrão CMD Exp. 01	8,6	Desvio Padrão CMA Exp. 01	13,3

Tabela 5.21 – Cálculo do custo do metal de adição por corpo de prova do experimento 02

		CÁLCULO DO MMD (massa de material depositado)				Cálculo do CMD (custo do material depositado)		Cálculo do CMA (custo do metal de adição)	
Experimento	Amostra	Área de Solda (cm ²)	Comprimento do cordão de solda (cm)	Densidade (kg/cm ³)	MMD (kg)	Custo do consumível (UM/kg)	CMD (UM)	Eficiência de Deposição (%)	CMA Exp. 02 (UM)
Exp. 02 - AT	1	5,69	100,00	0,0078	4,44	44,79	198,65	0,85	233,70
	2	6,15	100,00	0,0078	4,80	44,79	214,95	0,85	252,89
	3	3,96	100,00	0,0078	3,09	44,79	138,42	0,85	162,85
	4	5,50	100,00	0,0078	4,29	44,79	192,30	0,85	226,24
	5	6,18	100,00	0,0078	4,82	44,79	216,00	0,85	254,12
MÉDIA				Média MMD Exp. 02	4,29	Média CMD Exp. 02	192,07	Média CMA Exp. 02	225,96
DESVIO Padrão				Desvio Padrão MMD Exp. 02	0,7	Desvio Padrão CMD Exp. 02	31,7	Desvio Padrão CMA Exp. 02	37,3

Para melhor ilustrar a comparação entre os custos do metal de adição calculados no experimento 01 e experimento 02 representados nas tabelas 5.20 e 5.21, foi feito o gráfico mostrado na figura 5.21, sendo que no eixo "Y" são os valores dos custos do metal de adição medidos por corpo de prova e no eixo "X" a identificação das amostras.

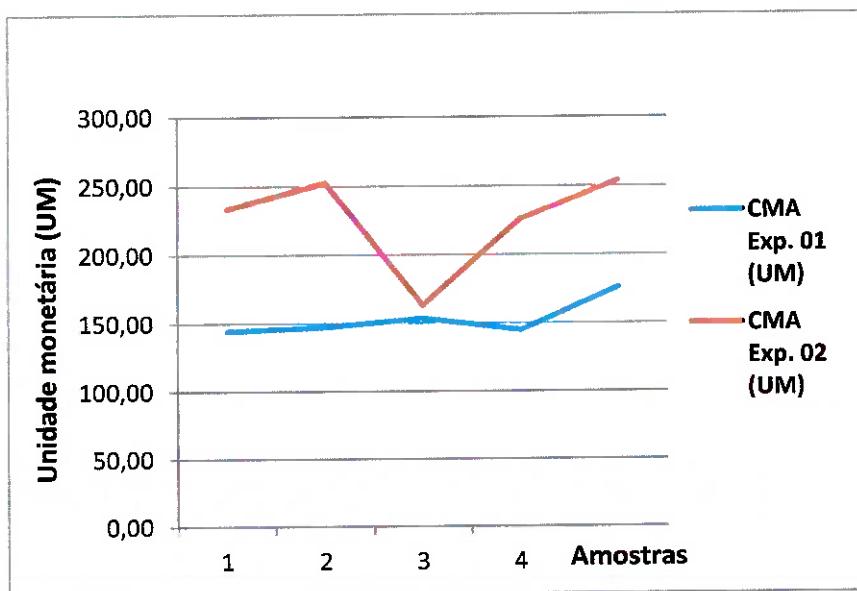


Figura 5.21 – Comparação dos custos do metal de adição por corpo de prova dos experimentos 01 e 02

O gráfico da figura 5.22 representa um comparativo entre a média e desvio padrão da massa do material depositado calculado nos experimentos 01 e 02.

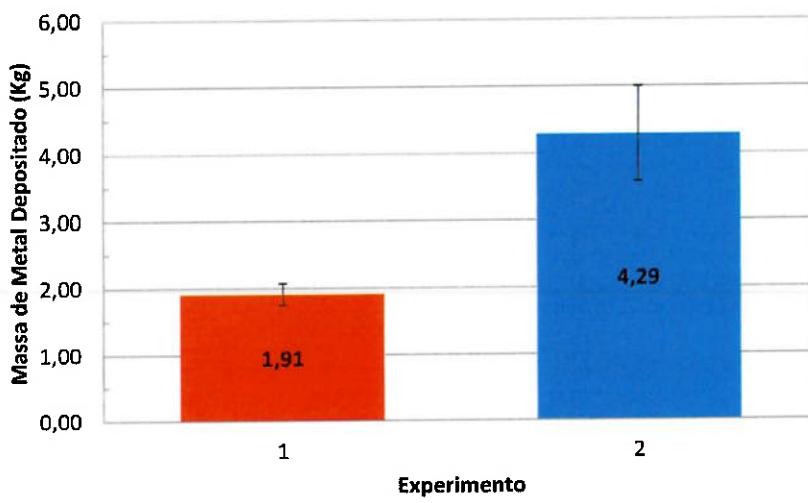


Figura 5.22 – Comparação das médias das massas do material depositado calculado nos experimentos 01 e 02

O gráfico da figura 5.23 representa um comparativo entre a média e desvio padrão do custo do material depositado calculado nos experimentos 01 e 02.

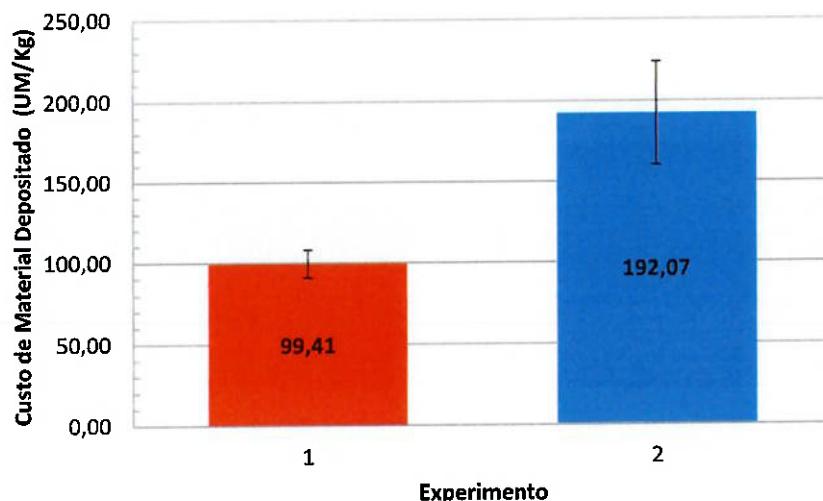


Figura 5.23 – Comparação das médias dos custos do material depositado calculado nos experimentos 01 e 02

O gráfico da figura 5.24 representa um comparativo entre a média e desvio padrão do custo do metal de adição calculado nos experimentos 01 e 02.

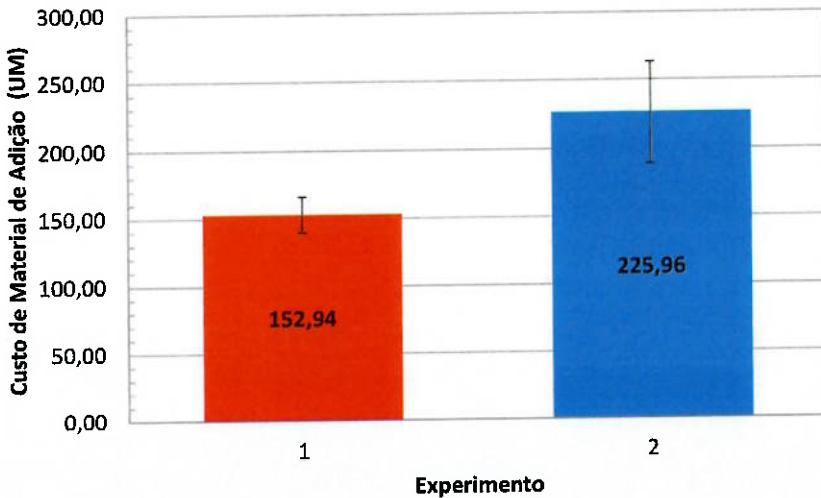


Figura 5.24 – Comparação das médias dos custos do metal de adição calculado nos experimentos 01 e 02

Observa-se que os custos do metal de adição para o experimento 01 são menores que os custos do experimento 02, isto ocorre, pois, o custo do metal de adição é calculado em função à área do cordão de solda. Conforme se pode observar nas tabelas 5.1 e 5.2, a área do cordão de solda no experimento 02 em média é aproximadamente duas vezes maior que a área dos cordões de solda no experimento 01. Observa-se que o corpo de prova 03 do experimento 02 que apresentou uma área do cordão de solda menor que os demais corpos de prova, da mesma forma o custo do metal de adição também apresentou valor menor.

5.3.2.2 CUSTO DO GÁS DE PROTEÇÃO

A tabela 5.22 e 5.23 representam os valores utilizados no cálculo do custo do gás (CG).

Tabela 5.22 – Cálculo do custo do gás por corpo de prova experimento 01

Cálculo do Custo do Gás					
Experimento	Amostra	Vazão do gás (l/min.)	Tempo de arco aberto (min.)	Custo do gás (UM/m ³)	CG Exp. 01 (UM)
Exp. 01 - TIG	1	9	167,40	47,90	1,24
	2	9	168,32	47,90	1,25
	3	9	174,43	47,90	1,30
	4	9	170,28	47,90	1,24
	5	9	184,42	47,90	1,35
MÉDIA		Média Tempo de Arco aberto Exp. 01	172,97	Média Custo do Gás Exp. 01	1,28
DESVIO PADRÃO		Desvio Padrão Tempo de Arco aberto Exp. 01	6,95	Desvio Padrão Custo do Gás Exp. 01	0,05

Tabela 5.23 – Cálculo do custo do gás por corpo de prova experimento 02

Cálculo do Custo do Gás					
Experimento	Amostra	Vazão do gás (l/min.)	Tempo de arco aberto (min.)	Custo do gás (UM/m³)	CG Exp. 02 (UM)
Exp. 02 - AT	1	19	37,75	19,82	0,24
	2	19	37,93	19,82	0,24
	3	19	37,29	19,82	0,23
	4	19	37,61	19,82	0,23
	5	19	38,18	19,82	0,24
MÉDIA		Média Tempo de Arco aberto Exp. 02	37,75	Média Custo do Gás Exp. 02	0,24
DESVIO PADRÃO		Desvio Padrão Tempo de Arco aberto Exp. 02	0,33	Desvio Padrão Custo do Gás Exp. 02	0,004

Para melhor ilustrar a comparação entre os custos do metal de adição calculados no experimento 01 e experimento 02 representados nas tabelas 5.22 e 5.23, foi feito o gráfico mostrado na figura 5.25, sendo que no eixo "Y" são os valores dos custos do gás medidos por corpo de prova e no eixo "X" a identificação das amostras.

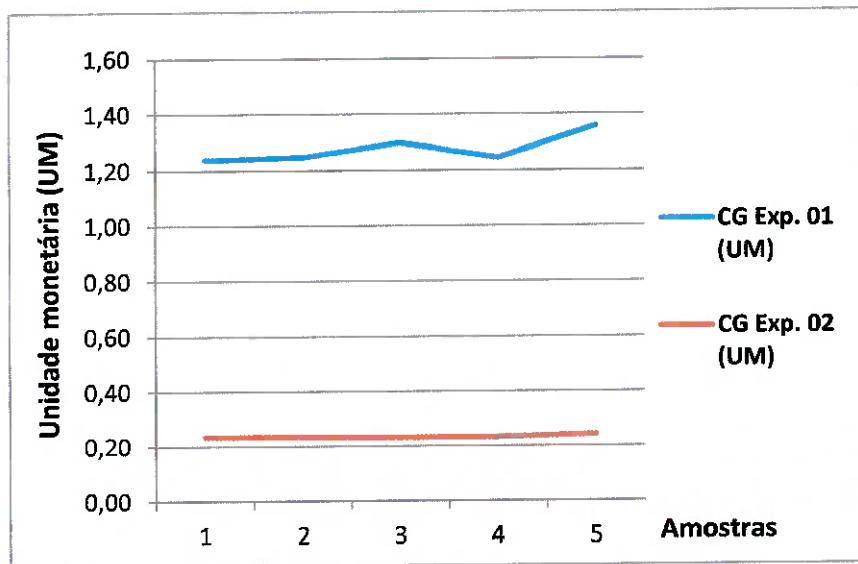


Figura 5.25 – Comparação dos custos do gás por corpo de prova dos experimentos 01 e 02

O gráfico da figura 5.26 representa um comparativo entre a média e desvio padrão do tempo de arco aberto medido nos experimentos 01 e 02.

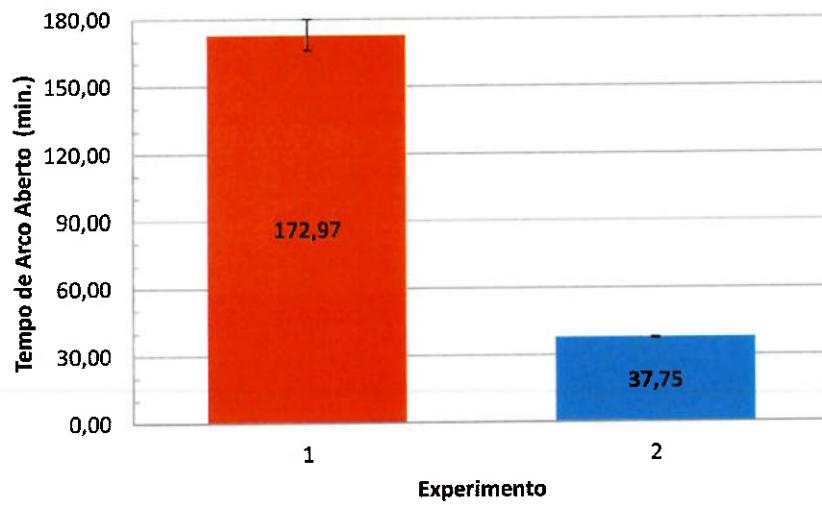


Figura 5.26 – Comparação das médias dos tempos de arco aberto medido nos experimentos 01 e 02

O gráfico da figura 5.27 representa um comparativo entre a média e desvio padrão do custo do gás calculado nos experimentos 01 e 02.

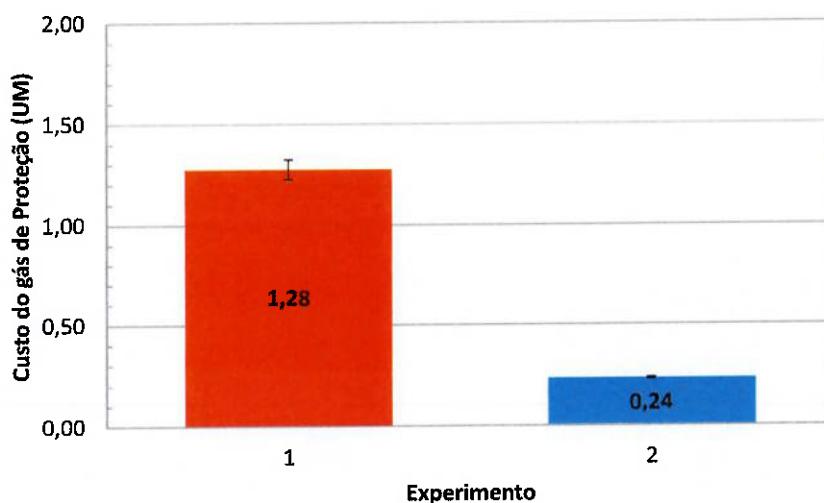


Figura 5.27 – Comparação das médias dos custos do gás calculado nos experimentos 01 e 02

Como se pode observar nas tabelas 5.20 e 5.21, apesar da vazão do gás ser praticamente a metade no experimento 01 em relação ao experimento 02, em média o custo do gás no experimento 01 foi aproximadamente cinco vezes maior em relação ao experimento 02. Isto se deve em função do tempo médio de arco aberto, que podemos observar na mesma tabela, foi aproximadamente quatro vezes maior no experimento 01 em relação ao experimento 02.

5.3.2.3 CUSTO TOTAL DA SOLDAGEM

As tabelas 5.24 e 5.25 representam os valores utilizados no cálculo do custo total da soldagem (CTS).

Tabela 5.24 – Cálculo do custo total da soldagem experimento 01

Cálculo do Custo Total da Soldagem					
Experimento	Amostra	CMO (UM)	CMA (UM)	CG (UM)	CTS Exp. 01 (UM)
Exp. 01 - TIG	1	1674,00	144,10	1,237	1819,34
	2	1683,20	146,99	1,247	1831,43
	3	1744,30	153,24	1,297	1898,84
	4	1702,80	144,60	1,244	1848,65
	5	1844,20	175,76	1,355	2021,32
Média Custo Total da Soldagem Exp. 01					1883,9
Desvio Padrão do Custo Total da Soldagem Exp. 01					82,6

Tabela 5.25 – Cálculo do custo total da soldagem experimento 02

Cálculo do Custo Total da Soldagem					
Experimento	Amostra	CMO (UM)	CMA (UM)	CG (UM)	CTS Exp. 02 (UM)
Exp. 02 - AT	1	377,50	233,70	0,235	611,44
	2	379,30	252,89	0,236	632,42
	3	372,90	162,85	0,234	535,98
	4	376,10	226,24	0,235	602,58
	5	381,80	254,12	0,244	636,16
Média Custo Total da Soldagem Exp. 02					603,7
Desvio Padrão do Custo Total da Soldagem Exp. 02					40,4

Para melhor ilustrar a comparação entre os custos totais da soldagem calculados no experimento 01 e experimento 02 representados nas tabelas 5.24 e 5.25, foi feito o gráfico mostrado na figura 5.28, sendo que no eixo "Y" é os valores dos custos totais da soldagem medidos por corpo de prova e no eixo "X" a identificação das amostras.

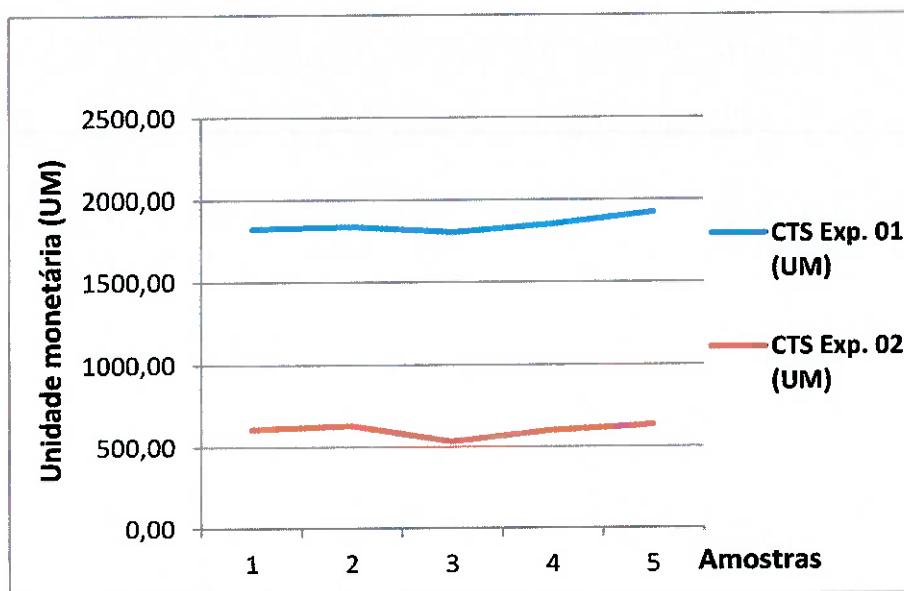


Figura 5.28 – Comparação dos custos totais da soldagem por corpo de prova dos experimentos 01 e 02

O gráfico da figura 5.29 representa um comparativo entre a média e desvio padrão do custo total da soldagem calculado nos experimentos 01 e 02.

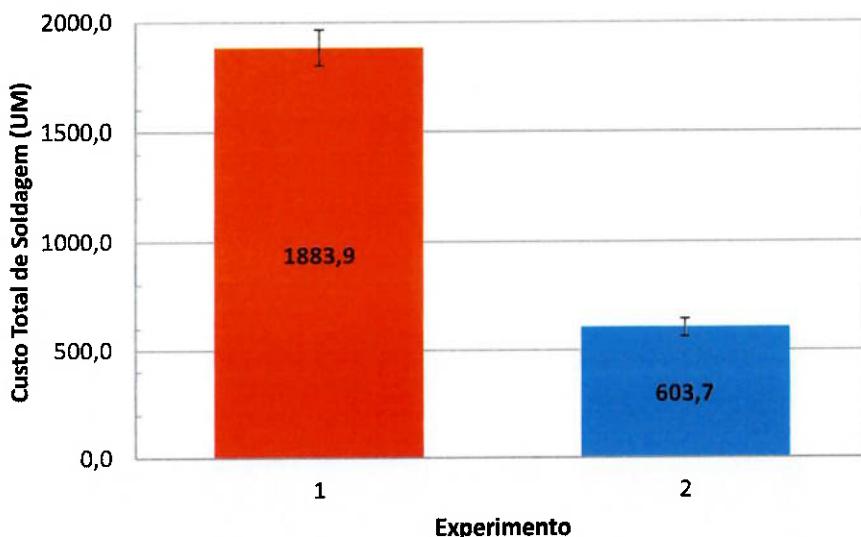


Figura 5.29 – Comparação das médias dos custos totais da soldagem calculado nos experimentos 01 e 02

Conforme se pode observar nas tabelas 5.24 e 5.25, os custos totais da soldagem no experimento 01, calculado com base nos experimentos realizados, foi cerca de três vezes maior comparando-se ao custo do experimento 02. A componente que mais influenciou no custo total foi o custo da mão de obra que conforme as tabelas 5.24 e 5.25 apresentou um resultado aproximado quatro vezes maior no experimento 01 em relação ao experimento 02. Mesmo os custos com metal de adição e custo do gás ter sido maiores no experimento 02, o custo da mão de obra teve mais expressão elevando os custo do experimento 01.

O custo da mão de obra está diretamente relacionado ao tempo de soldagem conforme observado nas tabelas 5.18 e 5.19.

6. CONCLUSÕES.

Com base nos materiais e métodos adotados pode-se concluir que:

1. Utilizando-se a técnica da dupla fusão com o processo arame tubular é possível realizar cordões de solda atingindo a penetração total, sem apresentar defeitos conforme resultado do ensaio de ultrassom e análise macrográfica.
2. Comparando-se a distorção angular na junta ensaiada pode-se dizer que a soldagem com dupla fusão com arame tubular apresentou uma distorção menor que a soldagem com dupla fusão utilizando-se o processo TIG. Este resultado pode ser evidenciado pelas diferenças nas energias de soldagem, que alteram as repartições térmicas.
3. Os custos da soldagem no processo arame tubular são mais baixos que os custos do processo TIG, pois o tempo de soldagem no arame tubular é cinco vezes mais baixo que no processo TIG.
4. É possível substituir o processo de soldagem TIG pelo Arame Tubular na fabricação de tanques de transformadores atendendo os requisitos de qualidade, reduzindo os custos e aumentando a produtividade.

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.

1. Realizar experimentos comparando a soldagem com abertura de raiz e sem abertura de raiz.
2. Realizar experimentos comparando a soldagem na raiz com o processo TIG e os demais passes com o processo arame tubular e compará-lo à soldagem com arame tubular iniciando na raiz até o acabamento.
3. Estudo da soldagem utilizando a técnica da dupla fusão em lados opostos da junta em ângulo para outros materiais como os aços inoxidáveis.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

1. WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELO, F. D. H. - Soldagem: Processos e Metalurgia. São Paulo: Ed. Edgar Blücher, 1992.
2. OKUMURA, T., TANIGUCHI, C. - Engenharia de Soldagem e Aplicações. Rio de Janeiro. Ed. LTC Livros Técnicos e Científicos. 1982.
3. MEYER, D. W., Flux Cored Arc Welding; Welding and Soldering. Metals Handbook; vol. 6, 10 ed. American Society of Metals, 1998.
4. STANDARD Symbols for Welding, Brazing, and Nondestructive Examination – ANSI/AWS A2.4-2007.
5. BRANDI, S. D, Metalurgia da Soldagem – SLD 026 (Material de aula) Especialização em Engenharia de Soldagem, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
6. WU, C. S.; ZHANG, M. X.; LI, K. H.; ZHANG, Y. M. Numerical Analysis of Double-Electrode Gas Metal Arc Welding Process. Computational Materials Science. 416 – 423p. accepted 11 July 2006.
7. ZHANG, Y. M., Pan, c. and Male A. T.; Welding of austenitic stainless steel using double sided arc welding process; Materials Science and technology, vol. 17, accepted 30 October 2001.
8. BRANDI, S. D, Terminologia – SLD 001 (Material de aula) Especialização em Engenharia de Soldagem, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
9. STANDARD Welding Terminology Terms and Definition; AWS A3.0:2001 An American National Standard

10. BRANDI, S. D, Soldabilidade de Materiais - Introdução – SLD 011
(Material de aula) Especialização em Engenharia de Soldagem, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
11. SILVA, M. F; Comparação da deformação entre a soldagem convencional e a soldagem simultânea da raiz com duplo arame em lados opostos da junta; Monografia (Especialização em Engenharia da Soldagem) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Programa de Educação Continuada em Engenharia – São Paulo, 2012.
12. LINNERT, E. G.. Welding Metallurgy; Ed. Third, vol. 2; chapter 11.
13. MARQUES, P., V.; MODENSI, P., J.; BRACARENSE, A., Q. – Soldagem: fundamentos e tecnologia. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2009.
14. QUALIFICATION Standard for Welding and Brazing Procedures, welders, Brazers, and Welding and Brazing Operators; ASME seção IX ; ed. 2010.
15. THE PROCEDURE HANDBOOK AF ARC WELDING. Lincoln Electric; Ed. fourteenth; section 3
16. PORTER, D., A.; Easterling, K., E. - Phase Transformations in Metals and Alloys; second edition; Chapman Hall; London; 1992