

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO TIG  
COM ALIMENTAÇÃO AUTOMÁTICA DE ARAME**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**LUIZ CARLOS DELGADO**

**FLORIANÓPOLIS, JULHO DE 2000**

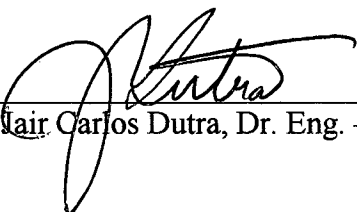
ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO TIG  
COM ALIMENTAÇÃO AUTOMÁTICA DE ARAME

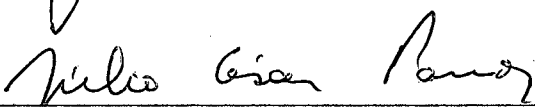
**LUIZ CARLOS DELGADO**

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

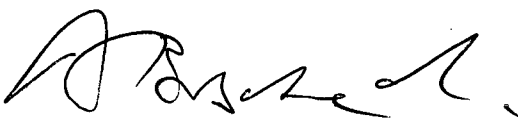
**MESTRE EM ENGENHARIA**

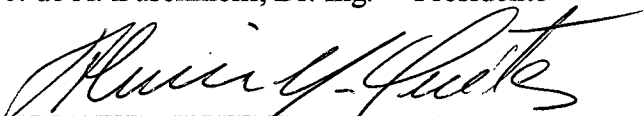
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA (ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: FABRICAÇÃO)  
E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA

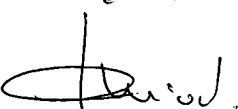
  
\_\_\_\_\_  
Prof. Jair Carlos Dutra, Dr. Eng. – Orientador

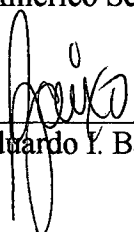
  
\_\_\_\_\_  
Prof. Júlio César Passos, Dr. Eng. – Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Augusto J. de A. Buschinelli, Dr. Ing. – Presidente

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Almir Monteiro Quites, Dr. Eng.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Américo Scotti, Ph. D.

  
\_\_\_\_\_  
Carlos Eduardo I. Baixo, Dr. Eng.

*Na verdade, entre os homens perfeitos falamos com sabedoria,  
não porém a sabedoria deste mundo, nem dos príncipes deste mundo,  
que estão sendo reduzidos a nada;  
Mas falamos a sabedoria de Deus em mistério,  
que esteve oculta, a qual Deus preordenou antes dos séculos  
para nossa glória, a qual também falamos,  
não com palavras ensinadas pela sabedoria humana,  
mas com palavras ensinadas pelo Espírito Santo,  
comparando coisas espirituais com espirituais.  
Porque a sabedoria deste mundo é loucura diante de Deus;  
Pois está escrito: Ele apanha os sábios na sua própria astúcia;  
Porque a um, pelo Espírito, é dada a palavra da sabedoria;  
A outro, pelo mesmo Espírito, a palavra da Ciência,  
que é Dom de Deus.*

Bíblia Sagrada, Novo Testamento, 1 Coríntios, Versículos 2 e 3.

*A minha adorável esposa Ione Guerim Delgado,  
pelo amor, carinho, dedicação, compreensão e valoroso apoio;  
Sempre presente em todos os momentos difíceis, alegres e tristes de nossas vidas;  
Sem você seria impossível todo o esforço dedicado a este trabalho.*

*Aos meus queridos pais  
Luiz José Delgado e Therezinha dos Santos Delgado,  
pelo exemplo de vida, educação exemplar e apoio.*

*Aos meus filhos Carlos Henrique, Carlos Eduardo e Kelly Priscilla,  
pelo valoroso amor, carinho e compreensão,  
que foram importantes durante todos os momentos difíceis desta jornada,  
para a realização deste Mestrado.*

*A minha querida irmã Luciana Delgado dos Santos  
e sobrinhos Marcus Vinicius, Ana Karolina e Victor Hugo,  
pelo apoio e preciosos momentos de alegria.*

*Ao meu amado irmão Júlio César Delgado,  
pelo valioso apoio, incentivo, exemplo de humildade e lição de vida;  
Sua lembrança estará eternamente em minha memória.  
( In Memorium )*

---

## AGRADECIMENTOS

- Ao meu orientador, Prof. Jair Carlos Dutra, por todos os conhecimentos transmitidos, incentivo e apoio, que foram fundamentais para a realização deste trabalho;
- Aos demais familiares, em especial aos meus sogros, pelo valioso apoio prestado;
- Ao meu amigo Guilherme e esposa, pelo estímulo e apoio durante todo o período de nossa convivência;
- À Escola de Aprendizes Marinheiros de Santa Catarina, na pessoa de seu Comandante, por todo apoio recebido;
- À Marinha do Brasil, pelo valioso apoio necessário à conclusão do Curso de Mestrado;
- Ao Projeto ROBOTURB / PADCT III e CNPq, por terem patrocinado este trabalho;
- A todos os meus amigos do LABSOLDA, em especial a Moisés, Prof. Carlos Ninõ, Erwin Teichmann, Aldo Pereira, Aldo Ramirez, Victor Vergara, Larry, Raul, Prof<sup>a</sup>. Cleide, Jean, Valério, Denise, Marcelo Motta, Tiago e Marcelo Correa;
- Aos bolsistas Alexandre, Wanderlei e Daniel, pelo apoio e também pelos momentos de alegria e descontração;
- A todos aqueles que de alguma maneira contribuíram para a realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xi
SIMBOLOGIA.....	xiv
RESUMO.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO.....	01
1.1 Introdução.....	01
1.2 Justificativa.....	01
1.3 Objetivos.....	03
CAPÍTULO II - O PROCESSO DE SOLDAGEM TIG.....	05
2.1 Introdução.....	05
2.1.1 Descrição do processo.....	05
2.1.2 Desenvolvimento do processo.....	06
2.1.3 Equipamento.....	07
2.1.4 Aplicabilidade.....	08
2.1.5 Vantagens e desvantagens.....	10
2.2 Fundamentos do processo.....	12
2.2.1 Princípios de operação.....	12
2.2.2 Polaridade.....	13
2.2.3 Gases de proteção.....	15
2.2.4 Eletrodo.....	16

---

a) Material.....	16
b) Tamanho e ângulo da ponta.....	17
2.2.5 Tocha.....	19
2.2.6 Corrente pulsada.....	19
2.2.7 Fonte de soldagem.....	20
2.2.8 Geometria do cordão em corrente pulsada.....	21
<b>CAPÍTULO III - O PROCESSO DE SOLDAGEM TIG COM ALIMENTAÇÃO AUTOMÁTICA DE ARAME.....</b>	<b>24</b>
3.1 Introdução.....	24
3.2 Fundamentos do processo.....	25
3.2.1 Arame Frio ( Cold Wire ).....	25
3.2.2 Arame Quente ( Hot Wire ).....	25
3.3 Aplicações.....	26
3.4 Equipamento.....	27
3.4.1 Alimentador automático de arame.....	28
3.5 Vantagens.....	32
<b>CAPÍTULO IV - MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>33</b>
4.1 Introdução.....	33
4.2 Equipamentos e Instrumentação.....	33
4.2.1 Fonte de soldagem “MTE DIGITEC 300”.....	34
4.2.2 Softwares “ OSCILOS ” e “ CALIGEN ”.....	36
4.2.3 “TARTÍLOPE VI”.....	37
4.2.4 “INTERDATA 3”.....	37
4.2.5 Cabeçote alimentador automático de arame “ STA TIG ”.....	38
4.2.6 Tocha TIG adaptada.....	39

---

4.2.7 “MVA”.....	40
4.2.8 Tacogerador.....	40
4.3 Metodologia.....	41
4.3.1 Introdução.....	41
4.3.2 Ensaio em posição plana.....	42
a) Realização dos ensaios.....	42
4.3.3 Ensaio em posição sobrecabeça.....	43
a) Introdução.....	43
b) Objetivo.....	44
c) Procedimento experimental.....	44
4.4 Parâmetros.....	48
4.4.1 Posição plana.....	48
4.4.2 Posição sobrecabeça.....	49
a) Introdução.....	49
b) Fatores fixos.....	51
c) Variáveis.....	52
d) Respostas.....	52
<b>CAPÍTULO V - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>53</b>
5.1 Introdução.....	53
5.2 Posição relativa arco-arame.....	53
5.3 Posição plana.....	55
5.4 Posição sobrecabeça.....	64
5.4.1 Validação do modelo.....	71
5.5 O reprojeto da tocha.....	73



---

CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	76
6.1 O processo TIG com alimentação automática de arame.....	76
6.2 Recomendações para trabalhos futuros.....	79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80

---

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Características técnicas da fonte de soldagem “MTE DIGITEC 300”.....	36
Tabela 4.2 – Ensaios realizados com aplicação dos critérios preestabelecidos.....	51
Tabela 5.1 - Parâmetros de soldagem utilizados para a realização dos ensaios (cavitec CCC)	65
Tabela 5.2 - Resultados da análise de variância (ANOVA) para $v_s$ , $t_p$ e $I_p$ ( $\alpha = 5\%$ ).....	71
Tabela 5.3 - Condições intermediárias para validação do modelo matemático proposto.....	72

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Sistema automático de movimentação da tocha (TARTÍLOPE V1).....	08
Figura 2.2 – Desenho esquemático do cabeçote alimentador de arame.....	08
Figura 2.3 – Diagrama esquemático do processo Arame Frio.....	09
Figura 2.4 – O processo TIG manual.....	11
Figura 2.5 – O processo TIG com alimentação semi-automática de arame.....	11
Figura 2.6 – O processo TIG com alimentação automática de arame.....	12
Figura 2.7 – Representação esquemática de uma corrente pulsada.....	20
Figura 2.8 – Representação esquemática de um cordão com 4 pontos de solda ( $n = 4$ ).....	22
Figura 2.9 – Representação esquemática para definição da largura (L) e altura do reforço dos depósitos ( $h_r$ ).....	22
Figura 3.1 – Cabeçote alimentador automático de arame (STA-TIG), desenvolvido no LABSOLDA / UFSC e utilizado neste trabalho.....	27
Figura 3.2 – Tocha TIG adaptada para alimentação automática de arame.....	28
Figura 3.3 – Desenho esquemático da tocha TIG com suporte adaptador.....	31
Figura 4.1 – Representação esquemática da bancada de ensaios.....	34
Figura 4.2 – Fonte de Soldagem “MTE DIGITEC 300”, com o cabeçote alimentador de arame “STA – TIG”.....	35
Figura 4.3 – Desenho esquemático da placa “INTERDATA 3”.....	37
Figura 4.4 - Desenho esquemático do painel frontal do Cabeçote STA-TIG.....	39
Figura 4.5 – Desenho esquemático do transdutor digital.....	40
Figura 4.6 – Resposta dinâmica medida pelo transdutor analógico.....	41
Figura 4.7 – Representação esquemática de cordão com frequência de pulsação incorreta (sobreposição de 50 %).....	46
Figura 4.8 – Representação esquemática de cordão com frequência de pulsação adequada (sobreposição de 80 %).....	46

---

Figura 4.9 - Representação esquemática de depósito muito convexo, na posição sobrecabeça	47
Figura 4.10 - Representação esquemática de depósitos com convexidade adequada, na posição sobrecabeça.....	47
Figura 4.11 – Bancada de ensaios para a posição sobrecabeça.....	48
Figura 4.12 – Desenho esquemático mostrando o correto posicionamento do arame.....	49
Figura 5.1 - Aspecto dos cordões realizados na posição plana, com alimentação do arame sendo realizada por trás do arco voltaico.....	54
Figura 5.2 - Aspecto dos cordões realizados na posição sobrecabeça, com alimentação do arame sendo realizada por trás do arco.....	54
Figura 5.3 - Cordões realizados em posição plana e com os mesmos parâmetros de soldagem. A) Alimentação pela frente do arco – B) Alimentação por trás.....	55
Figura 5.4 – Oscilograma de tensão na condição de arco estável.....	56
Figura 5.5 – Oscilograma da tensão na condição de alimentação insuficiente do arame.....	57
Figura 5.6 – Oscilograma da tensão na condição de alimentação excessiva do arame.....	58
Figura 5.7 – Oscilograma da tensão na condição de arco longo.....	58
Figura 5.8 – Oscilograma da tensão na condição de arco curto.....	59
Figura 5.9 – Limites para a velocidade do arame ( $v_s = 10$ cm/min).....	60
Figura 5.10 – Limites para a velocidade do arame ( $v_s = 20$ cm/min).....	60
Figura 5.11 – Velocidade ótima do arame para $v_s$ igual à 10 e 20 cm/min.....	61
Figura 5.12 – Velocidade ótima do arame em função da energia do arco, para $v_s$ igual à 10 e 20 cm/min.....	61
Figura 5.13 – Velocidade ótima do arame para duas alturas do arco, (3 e 5) mm.....	62
Figura 5.14 – Gráfico: taxa de deposição X potência do arco.....	63
Figura 5.15 – Comparação entre os processos TIG e MIG/MAG, baseada na corrente média.....	63
Figura 5.16 – Comparação entre os processos TIG e MIG/MAG, baseada na potência do arco.....	64
Figura 5.17 - Aspecto visual dos cordões na posição sobrecabeça ( cavitec CCC ).....	66

---

Figura 5.18 – Gráfico : $v_a = f(I_m ; v_s)$ , na posição sobrecabeça e corrente contínua constante.....	66
Figura 5.19 – Aspectos visuais dos cordões realizados com corrente pulsada e sobrecabeça..	67
Figura 5.20 - Seção transversal do cordão em escala natural, realizado durante o ensaio 6.....	68
Figura 5.21 – Gráfico $v_a = f(I_p ; t_p)$ ; $v_s = 10$ cm/min.....	69
Figura 5.22 – Gráfico $v_a = f(I_p ; t_p)$ ; $v_s = 20$ cm/min.....	69
Figura 5.23 – Gráfico $v_a = f(I_p ; t_p)$ ; $v_s = 30$ cm/min.....	70
Figura 5.24 - Aspecto visual dos cordões, realizados com a utilização do modelo matemático proposto.....	73
Figura 5.25 - Concepção final do reprojeto da tocha TIG para alimentação automática de arame (vista lateral).....	74
Figura 5.26 - Concepção final do reprojeto da tocha TIG para alimentação automática de arame (vista em perspectiva).....	75

---

## SIMBOLOGIA

%	=> Porcentagem
$\theta$	=> Fator de ciclo
$\alpha$	=> Nível de significância
$\delta_e$	=> Erro do modelo matemático
A	=> Ampere
A [mm]	=> Afastamento
ABNT	=> Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	=> Análise de variância
AWS	=> “American Welding Society”
C [mm]	=> Comprimento do cordão
CAVITEC	=> Arame tubular com pó metálico
CC	=> Corrente Contínua
CCC	=> Corrente contínua constante
CCP	=> Corrente contínua pulsada
cm	=> Centímetro
Cold Wire	=> Processo “Arame Frio”
GMAW	=> “Gas Metal Arc Welding”
h [60min]	=> Hora
Hot Wire	=> Processo “Arame Quente”
$h_r$ [mm]	=> Altura do reforço
Hz	=> Hertz
$I_b$ [A]	=> Corrente de base
$I_f$ [A]	=> Corrente final

---

$I_i$ [A]	=> Corrente inicial
$I_m$ [A]	=> Corrente média
INTERDATA 3	=> Placa de aquisição de dados
$I_p$ [A]	=> Corrente de pulso
J	=> Joule
k [ $10^3$ ]	=> Quilo
kg	=> quilograma
l	=> Litro
L [mm]	=> Largura do cordão
LABSOLDA	=> Laboratório de Soldagem da Universidade Federal de Santa Catarina
m	=> Metro
MIG/MAG	=> “Metal Inert Gas / Metal Active Gas”
min [60s]	=> Minuto
mm	=> Milímetro
ms	=> Milisegundo
MTE DIGITEC 300	=> Fonte de soldagem multiprocesso e microprocessada
MVA	=> Medidor de velocidade do arame
n	=> Número de pontos de solda
°	=> Grau
°C	=> Grau Celsius
R	=> Coeficiente de correlação
s	=> Segundo
S [%]	=> Sobreposição
STA - TIG	=> Cabeçote alimentador automático de arame para o processo TIG

---

T [s]	=> Período
TARTÍLOPE V1	=> Sistema microcontrolado de deslocamento da tocha
$t_b$ [s]	=> Tempo de base
$t_d$ [s]	=> Tempo de descida da corrente
TIG	=> “Tungsten Inert Gas”
$t_p$ [s]	=> Tempo de pulso
$t_s$ [s]	=> Tempo de subida da corrente
UFSC	=> Universidade Federal de Santa Catarina
V	=> Volt
$v_a$ [m/min]	=> Velocidade de alimentação do arame (média)
$v_b$ [m/min]	=> Velocidade de alimentação do arame (base)
$v_p$ [m/min]	=> Velocidade de alimentação do arame (pulso)
$v_s$ [cm/min]	=> Velocidade de soldagem
W	=> Watt



## RESUMO

Este trabalho se propõe caracterizar a soldagem pelo processo TIG com alimentação automática de arame. Para tanto, avaliou-se a deposição de metal em corpos-de-prova de aço carbono, utilizando corrente contínua constante e pulsada, tanto na posição plana, quanto na sobrecabeça. Procurou-se mostrar a aplicabilidade do processo TIG com adição automática de arame em operações onde somente o processo MIG/MAG é considerado viável. Buscou-se verificar comparações de taxa de deposição, adotando premissas adequadamente definidas. Ensaio realizados em posição plana apresentaram resultados que indicam um aumento considerável da produtividade do processo TIG com alimentação automática de arame, aproximando-se daqueles obtidos com o processo MIG/MAG, sem comprometimento da qualidade da solda. Procurou-se obter, também, o melhor inter-relacionamento das variáveis relevantes, envolvidas na soldagem pelo processo TIG pulsado com alimentação automática de arame, objetivando sua aplicação em estudos que tratam do sinergismo deste processo. O metal de adição utilizado foi o arame tubular "CAVITEC". Estes ensaios foram realizados por simples deposição, em corpos de prova de aço ABNT 1020, na posição sobrecabeça. Os resultados obtidos sugerem a criação de um modelo matemático capaz de inter-relacionar as variáveis de mérito envolvidas no processo, em função das condições de soldagem preestabelecidas. Portanto, obteve-se uma ferramenta básica e fundamental para o Controle Sinérgico do Processo TIG com Alimentação Automática de Arame, em corrente pulsada.

## ABSTRACT

The objective of this work is to characterize the TIG welding process with automatic wire feeding, evaluating the metal deposition in specimens of steel carbon, using constant and pulsed direct current in normal position and out of position, determining the possible benefits of this technology and making its productivity competitive, to show the applicability of Cold Wire tecnic in operations where MIG/MAG process is considered viable. The deposition rates were properly compared adopting defined premises. In normal position, executed experiments had presented results that indicate a considerable increase of the productivity in relation to conventional TIG process, coming close to those found with MIG/MAG process, without affecting the quality of the weld. A another purpose of this work is to obtain the best inter-relationship of the most significant variables, involved in the pulsed TIG welding process with automatic wire feeding, objectifying its application in studies that are the process with Automatic Control. This experiments were accomplished by simple deposition, in sample of steel ABNT 1020, in the out of position. The addition metal was the tubular wire "CAVITEC". Therefore, it was possible to determine a mathematical model capable to represent the experimental results accepted previously according to approaches established.

**Key Words:** Cold Wire; Automatic Fed TIG.

# CAPÍTULO I

# INTRODUÇÃO

## 1.1 Introdução

A automação dos processos de soldagem tem por objetivo aumentar a produtividade e assegurar a qualidade pela obtenção de maior repetibilidade da produção. Atualmente, no setor industrial brasileiro, se fala muito sobre qualidade total. Portanto, para a garantia da sobrevivência de diversas empresas, se busca o estudo da automação dos processos de soldagem para aumentar a qualidade de seus produtos e diminuir custos de fabricação. O processo TIG com alimentação automática de arame ainda não ocupa uma posição de destaque dentro do cenário mundial. Porém, essa alternativa, em breve, será reconhecida pelas empresas do setor produtivo, por suas características de produtividade e qualidade.

Neste contexto surgiu a proposta de desenvolvimento e aplicação do processo de soldagem TIG com alimentação automática de arame.

## 1.2 Justificativa

A produtividade de um determinado processo de soldagem nem sempre é apresentada de maneira isenta de falsas interpretações e expectativas. Erroneamente produtividade é relacionada com a taxa de deposição e assim, aquele processo que fornece o maior valor para esta grandeza é considerado o mais produtivo. Entretanto, a medição da produtividade deve considerar outros fatores. O que se diria, por exemplo, do processo de soldagem Plasma pela técnica “Keyhole”

em que se produz a solda sem qualquer material de adição? Deve-se considerar que as velocidades de soldagem neste processo são, por vezes, maiores que as do processo MIG/MAG [9].

Mesmo considerando somente os processos que inerentemente depositam material, a apresentação das taxas de deposição não leva em conta, na maioria das vezes, o aspecto de relatividade. Isto é, não relaciona esta produtividade com o que está entrando de insumos no processo. Assim, o relacionamento da taxa de deposição com a corrente de soldagem é, por vezes, indispensável, pois em muitas situações não se pode elevar o valor desta. Por isso, a produção baseada em taxa absoluta de deposição não é, nestes casos, uma informação satisfatória.

Desta forma, quando se comparam taxas de deposição dentro de um mesmo processo, é plenamente justificável o uso da corrente de soldagem como parâmetro de comparação. Entretanto, quando esta comparação é feita entre processos distintos, não se pode perder de vista o conceito de energia do arco. Este conceito é melhor compreendido quando se compara, por exemplo, os processos TIG e MIG/MAG. Para uma mesma corrente de soldagem, tem-se, no processo MIG/MAG, um valor de tensão do arco tipicamente próximo do dobro daquele valor para o processo TIG. Como a energia entregue ao arco voltaico, grande parte desta em forma de calor, é proporcional à corrente de soldagem e também à tensão do arco, conclui-se que o processo MIG/MAG possui níveis de energia do arco tipicamente o dobro daqueles usados no processo TIG, para uma mesma corrente de soldagem.

Não se deve comparar taxas de deposição entre dois processos diferentes sem antes trazê-los para o mesmo nível de energia do arco. Daí a grande importância de se incluir também a tensão do arco em qualquer método comparativo de taxa de deposição entre processos distintos de soldagem.

Além disso, quase a totalidade das informações existentes não é tratada com rigor científico. Existe, por exemplo, na soldagem, critérios adotados pelos metalurgistas que são diferentes daqueles utilizados pelo pessoal que trata dos processos. Assim, os metalurgistas consideram nos seus trabalhos, a energia do processo, dando então importância para a tensão de soldagem, havendo aí, uma dicotomia de tratamento dentro de um mesmo processo. É devido a isso que surgem tantas possibilidades de se provar o que se quer, dependendo das premissas consideradas.

Também o índice de retrabalho deve ser considerado como fator que afeta a produtividade, indo muito além da simples quantificação de um valor numérico.

É neste contexto que se insere o presente trabalho, o qual faz parte de uma nova linha de pesquisa (Projeto Roboturb), aberta no Laboratório de Soldagem da Universidade Federal de Santa Catarina (LABSOLDA / UFSC).

### 1.3 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal caracterizar a soldagem pelo processo TIG com alimentação automática de arame, de tal forma a estabelecer o melhor conjunto de parâmetros e variáveis que resultem em soldas de alta qualidade e elevada taxa de deposição do metal de adição, tanto na posição plana, quanto na posição sobrecabeça.

Os objetivos específicos são listados a seguir:

- Verificar as várias características operacionais do processo TIG com alimentação automática de arame;
- Obter informações relevantes necessárias ao aperfeiçoamento de equipamentos que utilizam esta nova tecnologia, para tornar viável a automatização da soldagem pelo processo TIG com adição de metal;

- Mostrar a aplicabilidade dos processos com eletrodos não consumíveis (de tungstênio) em operações onde só o processo MIG/MAG é considerado viável. Para tanto, buscar-se-á verificar comparações de taxa de deposição, adotando premissas adequadamente definidas.

## **CAPÍTULO II**

## **O PROCESSO DE SOLDAGEM TIG**

### **2.1 Introdução**

#### **2.1.1 Descrição do processo**

No processo de soldagem TIG, o calor necessário para efetuar a solda tem origem em um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo permanente de tungstênio e a própria peça a ser soldada.

O arco voltaico se forma em meio a um gás inerte, que tem a função adicional de proteger da oxidação, tanto o eletrodo de tungstênio, quanto o metal fundido, além de facilitar a criação de um caminho ideal para a passagem da corrente de soldagem [1].

Este processo foi inventado em 1930 e desenvolvido em 1941, primeiramente para fornecer um processo indicado para soldar o magnésio e o alumínio [2, 3]. Desde aquela época, o processo TIG vem evoluindo e hoje é usado para soldar quase todos os metais e suas ligas. Como o eletrodo não se constitui em material de adição, a necessidade de adicionar um metal de enchimento depende, basicamente, da forma e do tamanho da junção, além da finalidade da solda realizada. Em casos específicos, este metal de adição é usado apenas como material de enchimento para recompor áreas com excessivo desgaste.

### 2.1.2 Desenvolvimento do processo

Hobart e Devers foram os primeiros pesquisadores a soldarem com um arco elétrico entre um eletrodo não consumível de tungstênio e um metal base, em uma câmara preenchida com um gás inerte [2, 3]. Naquela ocasião foi emitida uma patente deste novo processo de soldagem. Suas experiências foram realizadas com o argônio e o hélio como gases de proteção, mas o processo não foi utilizado comercialmente, devido ao custo demasiadamente elevado do gás inerte. Em 1941, Russell Meredith e V.H. Pavlecka desenvolveram a primeira tocha prática, capaz de fixar um eletrodo de tungstênio e, ao mesmo tempo, fornecer um gás inerte para proteger a poça de fusão, o eletrodo e o metal base adjacente à poça fundida [2, 3]. O gás inerte foi alimentado através de um bocal que envolvia o eletrodo de tungstênio, fornecendo um meio adequado para proteger o arco voltaico quando este era movido ao longo da junção da solda. Uma nova patente foi emitida a Meredith em 1942 e o processo tornou-se conhecido como “Soldagem a Arco com Gás Hélio” [2, 3].

Embora o processo tenha sido desenvolvido com o gás hélio, o argônio logo transformou-se no gás de proteção mais usado, por causa de sua característica de boa estabilidade do arco voltaico e menor custo.

Tanto o desenvolvimento da tocha TIG, quanto o domínio da técnica pelo uso do processo de soldagem a arco com eletrodo de tungstênio e gás de proteção, foram motivados pela necessidade de se soldar ligas de magnésio para aplicações aeronáuticas [2, 3].

As primeiras aplicações com a soldagem de magnésio foram feitas com polaridade positiva do eletrodo e corrente contínua (CC +), usando fontes de alimentação de corrente constante do tipo motogerador ou conversor rotativo [3]. Esta polaridade foi usada para se obter a ação de limpeza necessária na soldagem do magnésio, porém, esta polaridade tinha o inconveniente da maior parte do calor ser desenvolvida no próprio eletrodo de tungstênio. Verificou-se logo que a alimentação com corrente alternada poderia fornecer a ação desejada de limpeza (eletrodo



positivo) e ainda desenvolver uma grande quantidade de calor necessária para garantir uma boa penetração do cordão soldado (eletrodo negativo).

### 2.1.3 Equipamento

Para a soldagem pelo processo TIG é requerida uma fonte de soldagem com característica estática “tombante” (isto é, do tipo corrente constante). Para a soldagem de aços e suas ligas utiliza-se, tanto corrente contínua constante, quanto pulsada. Para a soldagem do alumínio e suas ligas é necessário o uso de uma corrente alternada, com ou sem arco pulsado.

O processo de soldagem TIG requer, basicamente, um gás inerte e uma tocha, onde é fixado o eletrodo permanente de tungstênio, conectada a uma fonte de alimentação de energia elétrica por um cabo de alimentação. O cabo de alimentação, a mangueira de gás e, quando houver, a mangueira de água ficam inclusos dentro de um mangote protegido contra poeira e umidade.

Para tochas refrigeradas a água, é necessário um reservatório para a circulação da água de refrigeração, que pode ser enchido com água destilada. Estas tochas requerem, portanto, três mangueiras, uma para a fonte de água, uma para o retorno desta água e uma outra para a fonte de gás inerte.

Na soldagem automática, um sistema adicional é necessário para prover um meio de movimentar a tocha em relação à peça (Fig. 2.1) e também de alimentar automaticamente o arame até a poça fundida da solda (Fig. 2.2). Um sistema totalmente automático pode requerer até um circuito eletrônico que consiste, basicamente, em um microprocessador capaz de controlar a corrente de soldagem, a velocidade de soldagem e a velocidade de alimentação do arame de enchimento [3]. A leitura do capítulo III desta dissertação elucidará melhor este assunto.

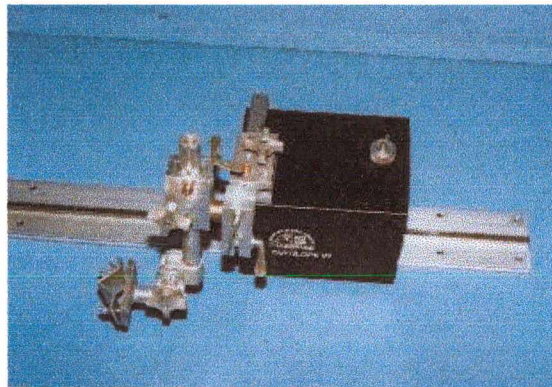


Figura 2.1 – Sistema Automático de Movimentação da Tocha (TARTÍLOPE V1).

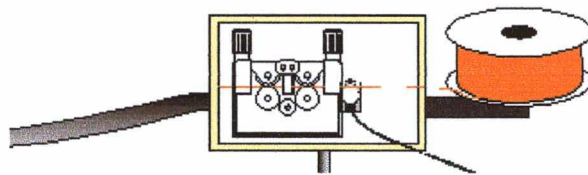


Figura 2.2 – Desenho Esquemático do Cabeçote Alimentador de Arame.

Pelo uso de um gás inerte (argônio, hélio ou uma mistura destes), deve-se incluir, no equipamento, reguladores de pressão e medidores de vazão de gás. Os gases geralmente são fornecidos em cilindros ou outros recipientes apropriados. O gás inerte que cerca a zona do arco voltaico e da solda protege o metal fundido da contaminação. Um diagrama esquemático de um arranjo completo é mostrado na Figura 2.3.

#### 2.1.4 Aplicabilidade

O processo TIG é capaz de produzir soldas de elevada qualidade em quase todos os metais e suas ligas. Entretanto, tradicionalmente este processo produz uma das menores taxas de deposição de metal de adição de todos os processos de soldagem a arco. Por esta razão, ele não é

usado normalmente, em aço carbono comum onde a elevada taxa de deposição é bastante requerida, enquanto que o elevado nível de qualidade não é tão necessário.

Este processo é freqüentemente usado para realizar o passe de raiz em tubulações de aço carbono, aço inoxidável, aço alta liga, ligas de cobalto e aço baixa liga, com adição de metal de enchimento [2, 3]. O restante do cordão é normalmente preenchido pelo processo Eletrodo Revestido ou processos semi-automáticos com arame contínuo, como o processo MIG/MAG (GMAW).

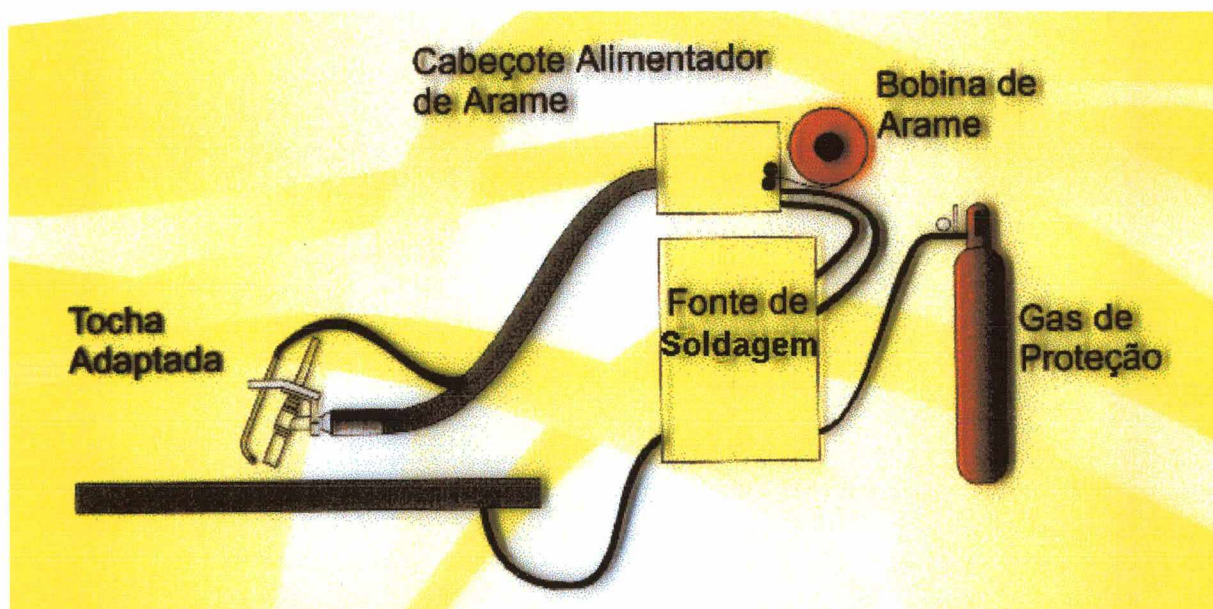


Figura 2.3 – Diagrama esquemático do processo Arame Frio.

Atualmente, o processo TIG é usado em ligas metálicas onde a elevada qualidade da solda e a condição crítica de contaminação atmosférica são relevantes. Como exemplos tem-se os metais reagentes e refratários, tais como: o titânio, o zircônio e o nióbio, onde as quantidades muito pequenas de oxigênio, nitrogênio e hidrogênio podem causar a perda de ductilidade e da resistência à corrosão [2, 3]. Pode ser usado, também, em aços inoxidáveis e nas super ligas a base de níquel, onde as soldas de qualidade elevada são requeridas, principalmente com respeito

à porosidade e à fissuração [2, 3]. O processo também é utilizado na soldagem de chapas finas de quase todos os metais soldáveis, isto porque ele pode ser facilmente controlado, mesmo com o uso de correntes muito baixas, da ordem de 2 a 5 A [3].

Um desenvolvimento relativamente recente do processo TIG, na soldagem de chapas espessas, é conhecido como “Arco Enterrado” ou “Processo à Arco Submerso com Eletrodo de Tungstênio”. Neste processo, uma tocha de grandes dimensões resfriada a água, com um eletrodo de tungstênio de diâmetro até 12mm, é posicionada de modo que a ponta do eletrodo esteja abaixo da superfície superior da chapa que está sendo soldada. Uma elevada energia do arco, devido a uma corrente de aproximadamente 1000 A, circula no metal fundido através do eletrodo de tungstênio. Chapas de 25 a 35 mm de espessura podem ser soldadas em dois passes e com pouca adição de metal de enchimento [3].

### 2.1.5 Vantagens e desvantagens

A principal vantagem do processo TIG é que as soldas de qualidade elevada podem ser realizadas em quase todos os metais e ligas soldáveis, excetuam-se as ligas de ponto de fusão muito baixo. Uma outra vantagem é que o metal de enchimento pode ser adicionado à poça fundida independentemente da corrente do arco, por se tratar de um processo com eletrodo consumível.

As soldas realizadas por este processo são limpas (isentas de respingos), livres de resíduo ou escória, e freqüentemente não requerem nenhum tratamento pós-soldagem, mesmo quando usadas para a deposição de metal de enchimento.

A principal desvantagem do processo TIG com alimentação manual do arame (Fig. 2.4) é sua baixa taxa de deposição do metal de enchimento. É, portanto, nesta característica que se concentra grande parte do estudo e desenvolvimento do processo TIG com alimentação semi-automática (Fig. 2.5) e automática de arame (Fig. 2.6).



Figura 2.4 – O processo TIG manual.



Figura 2.5 – O processo TIG com alimentação semi-automática de arame.

Outras desvantagens são: requer uma maior habilidade do soldador em soldagens manuais e é, geralmente, mais caro quando comparado a outros processos de soldagem a arco, como por exemplo Eletrodo Revestido [2, 3].

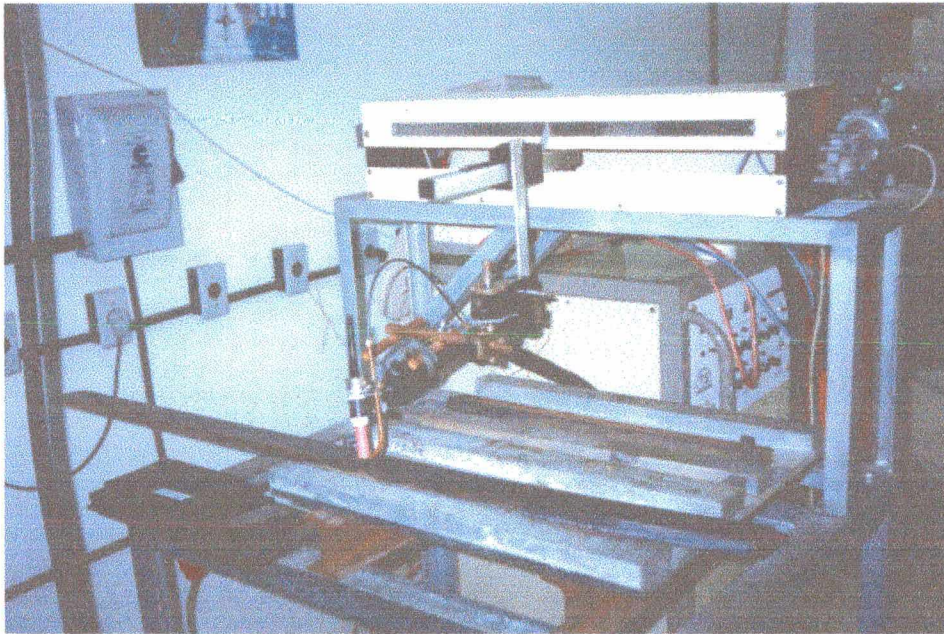


Figura 2.6 – O processo TIG com alimentação automática de arame.

## 2.2 Fundamentos do processo

### 2.2.1 Princípios de operação

No processo TIG, o calor total desenvolvido no arco voltaico é proporcional ao produto instantâneo entre a corrente de soldagem e a tensão do arco, onde a maior parte deste calor é gerada no terminal positivo do arco [2, 3].

Os elétrons que são emitidos pelo terminal negativo aquecido (cátodo) e obtidos pela ionização dos átomos do gás conduzem a maior parcela da corrente no arco voltaico. Estes elétrons são atraídos ao terminal positivo (ânodo) onde geram a maior parte do calor total do arco. Uma parcela menor da corrente do arco é carregada pelos íons positivos do gás, que são atraídos ao terminal negativo (cátodo) onde geram aproximadamente 30 % do calor do arco. O cátodo perde calor pela emissão dos elétrons e esta energia é transferida à peça quando os elétrons colidem com o ânodo. Esta é a principal razão do porquê uma quantidade significativamente maior de calor é desenvolvida no ânodo do que no cátodo [2, 3].

Como a quantidade maior de calor é gerada no ânodo, o processo TIG é operado normalmente com o cátodo (polaridade negativa) no eletrodo de tungstênio e a peça como ânodo (polaridade positiva). Por esta razão o calor é produzido onde ele realmente é necessário, ou seja, na peça a ser soldada.

A tensão através do arco voltaico é composta de três componentes: a tensão do cátodo, a tensão da coluna do arco e a tensão do ânodo [2, 3].

A tensão total do arco aumenta com o comprimento do arco, embora o tipo de gás de proteção também tenha influência sobre esta tensão. A tensão total do arco pode ser medida, porém as tentativas de medições das tensões do cátodo e do ânodo geralmente são mal sucedidas [3].

Entretanto, se a tensão total do arco for traçada num gráfico em relação ao comprimento do mesmo e extrapolada ao comprimento zero deste arco, uma tensão que se aproxima da soma da tensão do cátodo com a tensão do ânodo, pode ser obtida. Esta tensão determinada desta maneira está entre 7 e 10 V, para um cátodo de tungstênio com gás argônio [3].

### 2.2.2 Polaridade

O processo TIG pode ser usado em duas modalidades distintas: negativo no eletrodo ou corrente alternada.

A polaridade negativa no eletrodo tem uma desvantagem, pois não fornece a ação de limpeza na superfície do metal base. Porém, isto é de pouca importância para a maioria dos metais, porque seus óxidos se decompõem ou se fundem sob o elevado calor do arco voltaico.

Entretanto, os óxidos de alumínio e de magnésio são muito estáveis e possuem pontos de fusão bem acima daquele do metal base. Não seriam, portanto, removidos pelo calor do arco e remaneseriam na superfície do metal, restringindo, assim, a sua molhabilidade.

Na polaridade positiva do eletrodo, a ação de limpeza ocorre na superfície do metal base, pelo impacto de íons com a peça a ser soldada. Isto faz com que haja uma remoção de uma camada fina do óxido quando a superfície estiver sob a proteção de um gás inerte, permitindo que o metal fundido molhe a superfície antes que mais óxidos possam ser formados [3]. A desvantagem desta polaridade é que a maior parcela do calor desenvolve-se no eletrodo de tungstênio e a menor parcela na peça. Isto significa que para se obter o mesmo calor na peça com o positivo no eletrodo, comparado com o negativo no eletrodo, deve-se aumentar a corrente de soldagem. Este aumento de corrente aliado ao fato de que maior quantidade de calor está sendo desenvolvida no eletrodo positivo, significa que o eletrodo que se opera na polaridade positiva deve dissipar mais calor do que um eletrodo que se opera na polaridade negativa. Geralmente o diâmetro de um eletrodo de tungstênio para aplicação em polaridade positiva é maior do que o diâmetro de um eletrodo usado na polaridade negativa [3].

Na modalidade de corrente alternada, as características desejáveis de ambas as polaridades são obtidas. A limpeza é obtida em cada parte do ciclo de polaridade positiva e, nesta ocasião, uma pequena quantidade de calor é desenvolvida na peça. A área limpa na polaridade positiva durante o meio ciclo, permanecerá limpa durante o meio ciclo da polaridade negativa, quando protegida pelo gás inerte. Todavia, a maior parte do calor gerado é entregue à peça durante o meio ciclo da polaridade negativa [3].

Durante a soldagem do alumínio pelo processo TIG, ocorre o fenômeno de retificação. Este fenômeno existe porque a superfície limpa do alumínio não emite elétrons tão facilmente quanto o eletrodo aquecido de tungstênio. Isto só ocorre em fontes convencionais de soldagem. Algumas fontes incorporam circuitos que podem balancear os meios ciclos de polaridade negativa e positiva. Geralmente, esta característica é bastante desejável para a soldagem do alumínio [3].



Portanto, quando a limpeza máxima é desejada, a polaridade positiva do eletrodo é favorecida e quando o calor máximo é desejado, a polaridade negativa do eletrodo é favorecida.

### 2.2.3 Gases de proteção

Vários gases inertes poderiam ser usados na soldagem pelo processo TIG, mas somente o argônio e o hélio são usados comercialmente, porque são muito mais abundantes e muito mais baratos do que os outros gases inertes [2, 3].

Sob circunstâncias similares de corrente e comprimento do arco, a tensão do arco para o hélio é aproximadamente 1,7 vezes maior que para o argônio [3]. Consequentemente, o calor ou a energia consumida em um arco de hélio é aproximadamente 1,7 vezes maior que para um arco de argônio, para uma dada corrente de soldagem [3].

Esta característica de tensão mais baixa do arco com argônio, facilita a abertura do arco voltaico, sendo particularmente útil na soldagem manual de chapas finas. Na soldagem vertical e sobrecabeça, o baixo nível de calor gerado reduz a tendência ao escorrimento da solda [3].

O peso específico do argônio é aproximadamente 1,3 vezes maior que do ar e 10 vezes maior que do hélio. Por esta razão, o argônio, sendo mais pesado, cobre uma boa área da solda e é mais resistente às influências externas do que o hélio. O hélio, sendo muito mais leve do que o ar, tende a subir rapidamente e causar turbulências, que trazem o ar da atmosfera de volta ao arco [3].

Desde que o custo do hélio é aproximadamente três vezes o custo do argônio e a vazão requerida é de duas a três vezes aquela para o argônio, o custo do hélio como um gás de proteção pode chegar à 9 vezes o custo do argônio [3].

O hélio e as misturas de argônio e hélio são utilizados para soldagem de chapas grossas e para os materiais que têm alta temperatura de fusão com elevada condutividade térmica, porque

neste caso tem-se uma quantidade maior de calor gerado, para uma dada corrente de soldagem [3].

Embora, tanto o hélio, quanto o argônio possam ser usados com sucesso para muitas aplicações de soldagem TIG, o argônio é escolhido mais freqüentemente por causa da operação mais estável do arco voltaico e também do custo total menor.

#### **2.2.4 Eletrodo**

Ao selecionar o eletrodo para o processo TIG, cinco fatores devem ser considerados: material, tamanho, ângulo da ponta, tipo de tocha e bocal [2, 3].

##### **a) Material**

Todos os eletrodos de tungstênio estão normalmente disponíveis nos diâmetros de 0,3 a 6,4 mm e nos comprimentos de 75 a 300 mm [2, 3]. As exigências da composição química para estes eletrodos são dadas na especificação da AWS A5.12. Os eletrodos puros, que têm 99,5 % de tungstênio, são os mais baratos mas têm também a menor capacidade de emitir elétrons e uma baixa resistência à contaminação [3]. Os eletrodos com elementos de liga (que contêm 0,15 % a 0,4 % de zircônio, 1 % a 2 % de tório, 1 % de lantânio e até 1 % de cério) são os mais utilizados [2, 3].

Os eletrodos de tungstênio que contêm um ou dois por cento de tório têm uma emissividade maior de elétrons do que o eletrodo de tungstênio puro e, conseqüentemente, uma maior capacidade de suportar elevadas correntes por um maior intervalo de tempo [2, 3]. Portanto, possui uma vida útil mais longa.

Os eletrodos de tungstênio que contêm zircônio têm propriedades intermediárias entre aqueles de tungstênio puro e com tório. Estes eletrodos são recomendados para a soldagem com

o alumínio porque possuem uma resistência elevada à contaminação [3]. Uma outra vantagem dos eletrodos de tungstênio-zircônio é o fato de não serem radioativos e ainda possuírem uma boa característica de estabilidade do arco, além de uma vida útil maior do que os eletrodos de tungstênio-tório, principalmente quando usados em corrente alternada. Os eletrodos de tungstênio-lantânio são também relativamente novos. Além disso, o lantânio não é radioativo [3].

O tório é radioativo e pode apresentar perigos pela exposição externa e interna. Se as alternativas forem técnicas, podem ser usados, porém, diversos estudos realizados sobre os eletrodos a base de tório [17], mostraram que devido ao tipo de radiação gerado, podem ocorrer riscos à radiação externa: durante o armazenamento, durante a soldagem e também durante a eliminação dos resíduos, porém são insignificantes sob circunstâncias normais de uso [2, 3]. Durante a operação de afiar a ponta do eletrodo há uma geração de poeira radioativa, com o risco da exposição interna, ou seja, a inalação involuntária da poeira radioativa gerada. É conseqüentemente necessário usar uma ventilação de exaustão local para controlar a poeira em sua fonte, auxiliada, se necessário, pelo equipamento protetor respiratório [2, 3].

O risco da exposição interna durante a soldagem é considerado insignificante, uma vez que o eletrodo é consumido em uma taxa muito lenta. Como precauções devem também ser feitas proteções para controlar todo o risco da exposição durante a eliminação da poeira de quaisquer dispositivos para afiar a ponta do eletrodo.

#### **b) Tamanho e ângulo da ponta**

O diâmetro do eletrodo e o ângulo da ponta depende da aplicação, do material, da espessura, do tipo de junção e da quantidade a ser soldada [2, 3, 17]. Os eletrodos usados em corrente alternada ou em polaridade positiva, são de diâmetro maior do que aqueles usados para a polaridade negativa.

O comprimento total de um eletrodo é limitado pelo comprimento que pode ser acomodado pela tocha TIG. Comprimentos mais longos permitem um número maior de afiações da ponta do que comprimentos curtos e são, assim, mais econômicos.

A extensão da ponta do eletrodo para fora do suporte de fixação determina uma perda de calor e uma queda de tensão no eletrodo [4]. Embora este calor não seja aparentemente gerado no arco voltaico, a extensão do eletrodo deve ser o suficiente para manter uma determinada temperatura na ponta do mesmo.

A ponta bem afiada promove uma abertura mais fácil do arco voltaico, porém esta condição não é mantida por muito tempo porque com o calor gerado, a ponta ao se fundir, dará rapidamente forma a uma esfera pequena em sua extremidade. Todavia, o ângulo da ponta pode manter sua forma por um tempo de uso prolongado, desde que a soldagem seja realizada dentro de certos limites de corrente. Porém, nem sempre é possível adotar esta condição de soldagem, principalmente em chapas de maior espessura. Neste caso, se o diâmetro do eletrodo não for adequado, a corrente elevada pode causar o superaquecimento de sua extremidade e até fundi-lo. Entretanto, o uso de uma corrente de soldagem demasiadamente baixa resulta numa instabilidade do arco voltaico.

Para a soldagem com o eletrodo positivo, a forma desejável da ponta do eletrodo é um hemisfério do mesmo diâmetro que o eletrodo. Esta forma da ponta fornece uma superfície estável dentro dos valores usuais de corrente [4, 17]. Os eletrodos do tipo Zircônio são indicados para polaridade positiva do eletrodo porque têm uma capacidade maior ao bombardeio de elétrons do que os eletrodos puros de tungstênio, contudo dão forma prontamente a uma esfera sob circunstâncias normais de operação. Os outros eletrodos não possuem esta característica e, conseqüentemente, não são recomendados para soldagem com polaridade positiva [17].

O grau de afilamento na ponta do eletrodo afeta a geometria da solda, onde os ângulos maiores da ponta tendem a reduzir a largura do cordão e a aumentar assim a penetração [17].

### 2.2.5 Tocha

As tochas para soldagem TIG devem executar as seguintes funções:

- Fixar o eletrodo de tungstênio para que ele possa ser manipulado ao longo do trajeto da solda;
- Fornecer uma conexão elétrica ao eletrodo;
- Fornecer a condução do gás inerte para a ponta do eletrodo, para o arco e para a zona aquecida da solda;
- Isolar o eletrodo e as conexões elétricas do operador.

A tocha TIG consiste basicamente de um corpo metálico; um suporte do bocal, um bocal, um porta pinça e uma pinça para fixar o eletrodo de tungstênio. Para tochas manuais, um punho é conectado ao corpo da tocha.

### 2.2.6 Corrente pulsada

Em corrente pulsada, a fonte de soldagem fornece uma corrente em forma de uma onda retangular que pulsa ciclicamente entre dois valores denominados corrente de pulso ( $I_p$ ) e corrente de base ( $I_b$ ) em intervalos de tempo denominados respectivamente de pulso ( $t_p$ ) e de base ( $t_b$ ). A Figura 2.7 mostra uma representação esquemática de uma corrente pulsada com a opção de tempo de subida ( $t_s$ ) e descida ( $t_d$ ) gradual da corrente, tanto no início quanto no fim da soldagem, respectivamente. Esta pulsação da corrente traz benefícios metalúrgicos para a junta soldada e ainda facilita a execução de soldas fora da posição plana [1].

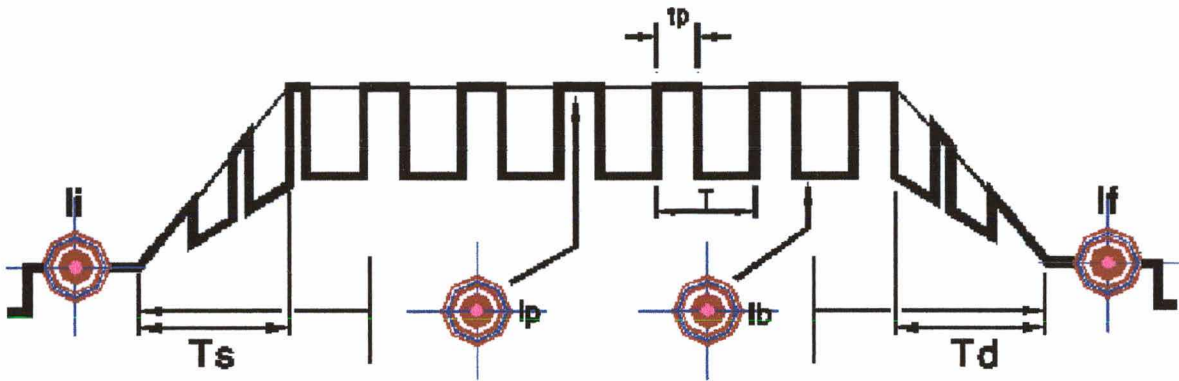


Figura 2.7 - Representação esquemática de uma corrente pulsada.

A utilização da corrente pulsada em soldagem TIG na posição sobrecabeça visa possibilitar o aquecimento e a formação de uma poça fundida durante o tempo de pulso (de elevada corrente) e permitir seu rápido resfriamento e solidificação durante o tempo de base (de baixa corrente), no qual a amplitude da corrente é apenas a necessária para manter um arco estável. A escolha correta dos parâmetros de pulso pode evitar o escorrimento indesejável da solda. Mediante o controle dos parâmetros de pulso é possível alterar o modo de solidificação e, conseqüentemente, melhorar a geometria do cordão soldado na posição sobrecabeça.

### 2.2.7 Fonte de soldagem

Um arco voltaico gerado por um eletrodo de tungstênio tem a tendência inicial de solicitar menos tensão para correntes progressivamente maiores. Isto acontece porque em correntes relativamente baixas, a mancha catódica possui temperatura também relativamente baixa e por isso, a emissão termoiônica necessita de maior tensão para impulsionar um número suficiente de elétrons à corrente requerida. Com o aumento da corrente de soldagem, o grau de ionização do

arco voltaico é progressivamente aumentado, significando uma diminuição da resistência à passagem da corrente e uma tendência à diminuição da tensão do arco [19].

Portanto, uma fonte de soldagem que apresente características estáticas muito tombantes (tipo corrente constante) constitui o tipo indicado para a soldagem pelo processo TIG. Estas fontes podem incorporar características opcionais, tais como: curva de subida da corrente, curva de descida da corrente e corrente pulsada. As fontes de tensão constante só podem ser usadas se for possível a inserção de uma resistência elétrica em série com o arco. Assim, de acordo com o valor de corrente que fosse necessário para a soldagem, dever-se-ia ajustar o valor da resistência para se obter uma queda de tensão, tal que o saldo fosse o valor da tensão do arco, ou a utilização de um indutor para tal finalidade [19].

Estas fontes podem incorporar válvulas que controlam o fluxo do gás inerte e da água de refrigeração para a tocha.

Uma opção para a abertura do arco voltaico é a alta frequência, que muitas vezes é usada em substituição ao toque do eletrodo à peça onde, neste caso, existe a possibilidade de contaminação do tungstênio na solda. O “lift arc” (abertura do arco ao toque do eletrodo à peça) reduz esta contaminação. Isto ocorre porque a corrente de soldagem assume valores pequenos durante a abertura do arco voltaico. As fontes mais avançadas incorporam características que permitem pulsar a corrente de soldagem.

### 2.2.8 Geometria do cordão em corrente pulsada

Basicamente são quatro os parâmetros que determinam a geometria do cordão em corrente pulsada: largura do cordão ( $L$ ), altura do reforço ( $h_r$ ), sobreposição ( $S$ ) e afastamento ( $A$ ).

A largura do cordão ( $L$ ) é definida como sendo a média das larguras máximas, para um número “ $n$ ” de pontos de solda [16]. A Figura 2.8 representa esquematicamente um cordão com

4 pontos de solda ( $n = 4$ ). A altura do reforço ( $h_r$ ) é definida como sendo a média das alturas máximas, para um número “ $n$ ” de pontos de solda (Fig. 2.9).

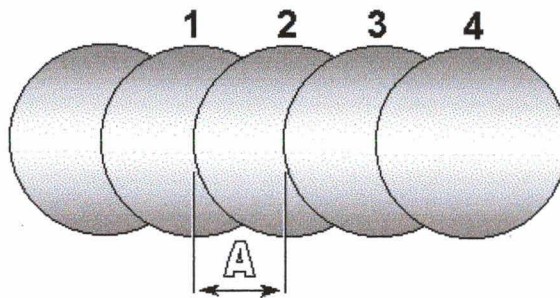


Figura 2.8 - Representação esquemática de um cordão com 4 pontos de solda ( $n = 4$ ).

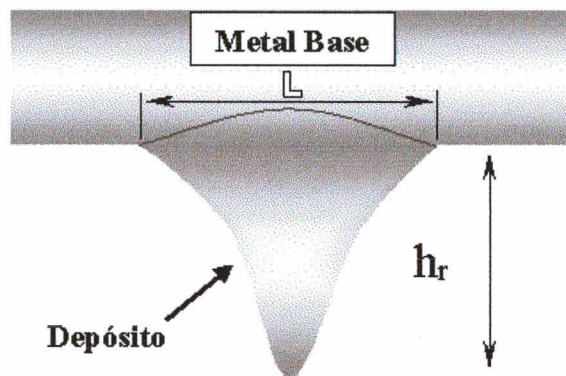


Figura 2.9 – Representação esquemática para definição da largura ( $L$ ) e altura do reforço dos depósitos ( $h_r$ ).

Considerando a poça de fusão como pontos circulares de solda, a sobreposição é um número adimensional que representa a fração de um ponto de solda ocupada pelo ponto de solda seguinte [16], definida segundo a relação geométrica abaixo :

$$S = 1 - \frac{C}{L.n} \quad (2.1)$$



Onde:  $C$  = comprimento do cordão,  $L$  = largura do cordão e  $n$  = número de pontos de solda.

Portanto, com base nesta relação pode-se observar que :

- a) para  $0 < S < 1$ , há sobreposição e o cordão é contínuo;
- b) para  $S = 0$ , os pontos de solda são tangentes e
- c) para  $S < 0$ , não há sobreposição e o cordão é descontínuo.

A sobreposição ( $S$ ) é, portanto, o resultado da distância entre os pontos de solda e a largura dos mesmos.

O afastamento ( $A$ ) representa a distância (em unidades de comprimento) entre o centro de um ponto de solda e o centro do ponto de solda seguinte (Fig. 2.8), sendo definido segundo a relação geométrica abaixo [16]:

$$A = L(1 - S) \quad (2.2)$$

É interessante observar que, quando  $n = 1$  o afastamento ( $A$ ) representa o próprio comprimento do cordão ( $C$ ) e neste caso, as duas relações acima se confundem, ou seja, representam uma única relação geométrica.

Tem-se uma outra expressão matemática ( 2.3 ) bastante utilizada e que deriva da expressão ( 2.2 ) acima:

$$S = 1 - \frac{A}{L} \quad (2.3)$$

Esta expressão permite o cálculo da sobreposição ( $S$ ), através da medição direta do afastamento ( $A$ ) sobre o cordão.

## CAPÍTULO III

# O PROCESSO DE SOLDAGEM TIG COM ALIMENTAÇÃO AUTOMÁTICA DE ARAME

### 3.1 Introdução

Cada processo de soldagem apresenta características próprias que, geralmente, não conseguem atender às necessidades de qualidade e produtividade simultaneamente. Tradicionalmente, o processo MIG/MAG detém uma boa parcela do mercado mundial, uma vez que seu nível de produtividade é elevado, se comparado à outros processos de soldagem tradicionais.

O processo TIG possui características típicas que lhe confere um elevado nível de qualidade, em comparação à outros processos de soldagem convencionais. Entretanto, quando se faz necessário a adição de material, tem-se uma soldagem tradicionalmente conseguida de maneira muito lenta, por ser realizada manualmente pelo soldador. Por esta razão é que existe a grande motivação ao estudo e desenvolvimento do processo TIG com alimentação automática de arame.

O estudo deste processo iniciou-se durante a década de 60 [2, 3]. Atualmente existem dois tipos distintos de alimentação automática de arame, denominados: “Cold Wire” (Arame Frio) e “Hot Wire” (Arame Pré-aquecido). Esta técnica também pode ser estendida aos processos Plasma e Arco Submerso.

## 3.2 Fundamentos do processo

### 3.2.1 Arame Frio ( Cold Wire )

Neste processo o arame bobinado é alimentado automaticamente por um tracionador automático de arame. A denominação “Arame Frio”, em inglês “Cold Wire”, dada ao processo TIG com alimentação automática de arame, se deve ao fato de que o arame é alimentado à temperatura ambiente.

### 3.2.2 Arame Quente ( Hot Wire )

Ao contrário do processo “Arame Frio”, neste o arame sofre um pré-aquecimento antes de atingir o arco voltaico.

A princípio, este processo pode reunir todas as características encontradas no processo Arame Frio, porém, possui a peculiaridade de se estabelecer um pré-aquecimento do arame, antes deste entrar em contato com o arco voltaico, com o objetivo de possibilitar um aumento da taxa de fusão do arame e, conseqüentemente, um aumento de sua taxa de deposição. Trabalhos publicados [6, 7, 10, 11] apresentam resultados que confirmam este aumento de produtividade, obtendo-se cordões com qualidade semelhante àquela obtida pelo processo Arame Frio.

O pré-aquecimento do arame é obtido através da passagem de uma corrente elétrica pelo mesmo, num pequeno trecho de 40 a 60 mm, entre o contato elétrico e o arco voltaico. Este pequeno trecho é denominado de “Comprimento Aquecido do Arame”. A resistência elétrica que o arame possui, produz nele, um pré-aquecimento necessário e suficiente para aumentar sua taxa de fusão.

Uma vez que o arame é pré-aquecido, podendo chegar a uma temperatura de até 300 °C, ele necessita de menor energia do arco para atingir a temperatura ambiente. Portanto, pode-se dizer que este processo possui uma melhor eficiência, se comparado ao processo “Arame Frio”. Isto lhe proporciona uma melhor taxa de deposição com maiores velocidades de soldagem [7, 11].

### 3.3 Aplicações

O processo TIG com alimentação automática de arame é indicado para uma ampla variedade de aplicações, tais como soldas críticas em vasos de pressão à alta temperatura e soldas de fabricação em equipamentos para serviço criogênico (à baixas temperaturas). Ele serve também às aplicações como passe de raiz em soldas de membros estruturais altamente críticos e soldagem de tubos de aço carbono na construção de plataformas de petróleo “Offshore”.

Uma aplicação específica do processo “Arame Frio” é a soldagem de chapas finas de aço inoxidável para a indústria de alimentos [6, 10].

Atualmente já se estuda o processo “Arame Frio” em soldagem submarina pela técnica hiperbárica a seco. Entretanto, pela redução obtida na largura do arco voltaico, torna-se difícil a manutenção correta da posição do arame durante a soldagem, proporcionando, assim, uma susceptibilidade a falhas decorrentes de falta de fusão do arame [11].

O processo “Arame Quente” pode ser aplicado em soldagem de tubos de parede espessa no sentido circunferencial e principalmente quando se desejar uma elevada taxa de deposição com a mesma qualidade obtida pelo processo “Arame Frio” [6].

### 3.4 Equipamento

O processo TIG com alimentação automática de arame necessita, basicamente, de duas modificações do equipamento empregado no processo convencional (alimentação manual do arame), a saber:

A primeira modificação está na utilização de um cabeçote alimentador automático de arame (Fig. 3.1), similar ao usado no processo MIG/MAG convencional, inclusive utilizando-se o mesmo tipo de bobina de arame. O alimentador utilizado para o processo TIG, apesar de ser similar àquele usado para o processo MIG/MAG, ainda assim, possui diferenças peculiares que são necessárias para o desempenho de suas funções.



Figura 3.1 – Cabeçote Alimentador Automático de Arame (STA-TIG), desenvolvido no LABSOLDA / UFSC e utilizado neste trabalho.

A segunda modificação está na tocha (Fig. 3.2), que necessita de um suporte adaptador capaz de possibilitar o melhor posicionamento da extremidade do arame, direcionando-o até a poça fundida, sob o arco voltaico formado. O arame é, então, desenrolado da bobina e guiado através de um duto flexível paralelo ao mangote da tocha, desde o alimentador automático até a poça fundida.



Figura 3.2 – Tocha TIG adaptada para alimentação automática de arame.

Para a utilização do processo “Arame Quente”, é necessário, também, um dispositivo responsável pelo pré-aquecimento do arame, que pode ser uma fonte de energia independente ou a própria fonte de soldagem.

### 3.4.1 Alimentador automático de arame

Os cabeçotes alimentadores de arame para o processo TIG automático ou semi-automático devem ser capazes de alimentar o arame, com uma velocidade controlada, a partir de uma bobina e, através de um conduto, conduzi-lo até a poça fundida da solda.

O sistema completo de alimentação do arame consiste basicamente de uma sustentação para a bobina de arame, de um mecanismo de tracionamento do arame, de um controle da

velocidade de alimentação e de um conduíte para guiar o arame desde o mecanismo tracionador até a poça da solda.

Os alimentadores de arame são usados, quase que exclusivamente, em soldagens TIG automáticas, embora os alimentadores portáteis de arame possam ser usados para a soldagem TIG manual [3].

O mecanismo de tracionamento do arame consiste em um motor elétrico, uma caixa de engrenagens redutora de velocidade e um jogo de roletes tracionadores para imprimir a movimentação ao arame. A principal diferença entre os mecanismos tracionadores para MIG/MAG e TIG é a faixa de velocidade. Aquele para uso em TIG possui a faixa de velocidade de alimentação do arame variando entre 0,5 e 5,1 m/min [3], enquanto aquele para soldagem MIG/MAG varia a velocidade de alimentação de 2,5 a 25 m/min [3, 8].

Geralmente, um único par de roletes tracionadores é usado para o processo TIG. Ambos os roletes podem ser tracionados ou, um pode ser tracionado e o outro conduzido. Todavia, uma alimentação de arame mais adequada e com menos deslizamentos é alcançada quando ambos os roletes são tracionados. O rolete tracionado, geralmente, tem um sulco serrilhado em " V " para o uso em material tal como o aço, o aço inoxidável, ligas de níquel e titânio [3, 6].

O rolete do tensor (conduzido) pode ser liso ou ter um sulco em " V ". Para materiais macios tais como o cobre e o alumínio, os sulcos em " V " devem ser usados em ambos os roletes. Os roletes serrilhados não devem ser usados em arame macio porque há uma tendência em marcar o arame, produzindo pequenas limalhas, que podem ser transferidas ao tubo de contato e causar o travamento do arame. Alguns mecanismos de movimentação usam dois pares de roletes, onde todos são tracionados. Entretanto, este arranjo é usado principalmente para soldagem MIG/MAG, onde os arames são alimentados com uma velocidade mais elevada do que aquela usada para o processo TIG [6, 8].

A finalidade da unidade de controle é permitir que a velocidade de alimentação do arame seja ajustada para qualquer corrente de soldagem requerida e garantir a manutenção dessa velocidade. O controlador de velocidade pode ter um interruptor de movimento invertido e um interruptor de movimento direto de modo que o arame possa ser avançado ou retraído [6].

Depois que o arame sai dos roletes de movimentação, ele entra em um tubo guia e passa por um conduíte, finalmente sai por um pequeno tubo curvado que entrega o arame para ser posicionado exatamente na poça de fusão da solda, na região delimitada pelo cone formado pelo arco voltaico. Este posicionamento é fundamental para garantir uma alimentação adequada de arame durante o processo, evitando-se paradas ou interrupções que possam prejudicar a correta deposição do metal de adição.

O conduíte guia geralmente é flexível e contém uma forração interna de nylon ou teflon. O comprimento pode ser de alguns centímetros a vários metros, dependendo das posições relativas entre o mecanismo de movimentação, o cabeçote alimentador, e a tocha TIG [3].

Para possibilitar ao usuário uma flexibilidade quanto ao correto posicionamento do arame na poça de fusão, existe um suporte preso à tocha que fornece o necessário ajuste da posição e do ângulo, através de um parafuso de aperto manual, montado sobre a tocha e próximo à extremidade do bocal (Fig. 3.3).

Se um alimentador automático de arame for usado para a soldagem TIG manual, o soldador possui a opção de segurar a extremidade do bocal do tubo guia em uma das mãos e a tocha TIG na outra. Um botão interruptor no tubo guia ou um pedal pode controlar o início e o fim da alimentação do arame [3, 6].



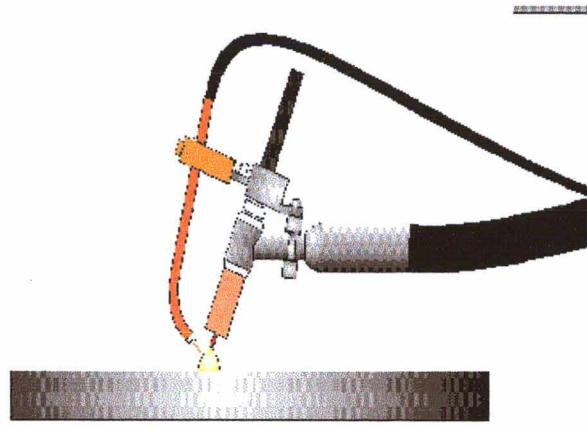


Figura 3.3 – Desenho esquemático da tocha TIG com suporte adaptador.

Na modalidade “semi-automático”, o tubo guia curvado está unido diretamente à tocha, por esta razão requer o uso de apenas uma das mãos do soldador (Fig. 2.5). Já o processo TIG automático se caracteriza pelo uso de um dispositivo automático (Fig. 2.1), responsável pelo movimento da tocha na direção da velocidade de soldagem, dispensando assim, o uso das duas mãos do soldador (Fig. 2.6).

Portanto, em soldagem TIG com metal de adição, o processo manual é aquele em que há a necessidade do uso das duas mãos do soldador, uma para alimentar o arame e a outra para conduzir a tocha (Fig. 2.4). Uma variante do processo manual é aquela em que o soldador segura a extremidade da guia do arame com uma das mãos, mas este é impulsionado automaticamente. O processo semi-automático é aquele em que o uso de apenas uma das mãos do soldador se faz necessário, já que a alimentação de arame é feita automaticamente. O soldador necessita apenas de conduzir a tocha com uma de suas mãos (Fig. 2.5). O processo automático é aquele em que, tanto o movimento de alimentação do arame, quanto o movimento realizado pela tocha na direção de soldagem são feitos automaticamente (Fig. 2.6).

### 3.5 Vantagens

Comparado a outros processos automáticos e semi-automáticos de soldagem, o processo TIG com alimentação automática de arame oferece vantagens ao usuário não encontradas em outros processos. Todas as vantagens associadas ao processo TIG convencional também estão disponíveis aos usuários do processo TIG com alimentação automática de arame.

Devido à alimentação contínua e automática do arame, se podem produzir cordões uniformes ao longo de toda a sua extensão. Esta uniformidade do cordão é difícil de se conseguir com a alimentação manual do arame, além do que, sendo fixo o comprimento da vareta utilizada pelo soldador, obriga-o à substituí-la regularmente e, assim, é interrompida a continuidade do processo.

Ao contrário dos processos de soldagem que utilizam um eletrodo consumível, o metal de enchimento não está energizado eletricamente. Isto simplifica sobremaneira, tanto o equipamento requerido, quanto a operação do processo.

O processo TIG com alimentação automática de arame é aplicável à diversas condições de soldagem em campo, obtendo-se elevadas taxas de deposição, sem a necessidade de automação total do processo.

## CAPÍTULO IV

## MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Introdução

Com o objetivo de facilitar a realização dos ensaios, a compreensão dos resultados obtidos e a comparação entre eles, os ensaios foram realizados em duas posições distintas de soldagem, plana e sobrecabeça.

Todos os equipamentos e “softwares” de controle e medição necessários ao desenvolvimento deste trabalho foram projetados e fabricados pelo Laboratório de Soldagem da Universidade Federal de Santa Catarina, com o objetivo de viabilizar a automatização da soldagem TIG com adição automática de metal.

### 4.2 Equipamentos e Instrumentação

Para a realização deste trabalho foi utilizada a bancada de ensaios representada esquematicamente pela Figura 4.1:

1. Uma fonte de soldagem multiprocesso e microprocessada “MTE DIGITEC 300”;
2. Os Softwares “OSCILOS” e “CALIGEN”;
3. Um sistema microcontrolado de deslocamento da tocha “TARTÍLOPE V1”;
4. Uma placa de aquisição de dados “INTERDATA 3”;
5. Um cabeçote alimentador automático de arame “STA TIG”;

6. Uma tocha TIG com suporte adaptador para alimentação automática de arame;
7. Um medidor de velocidade do arame, modelo “ MVA ”;
8. Um medidor de velocidade do arame do tipo “ tacogerador ”.

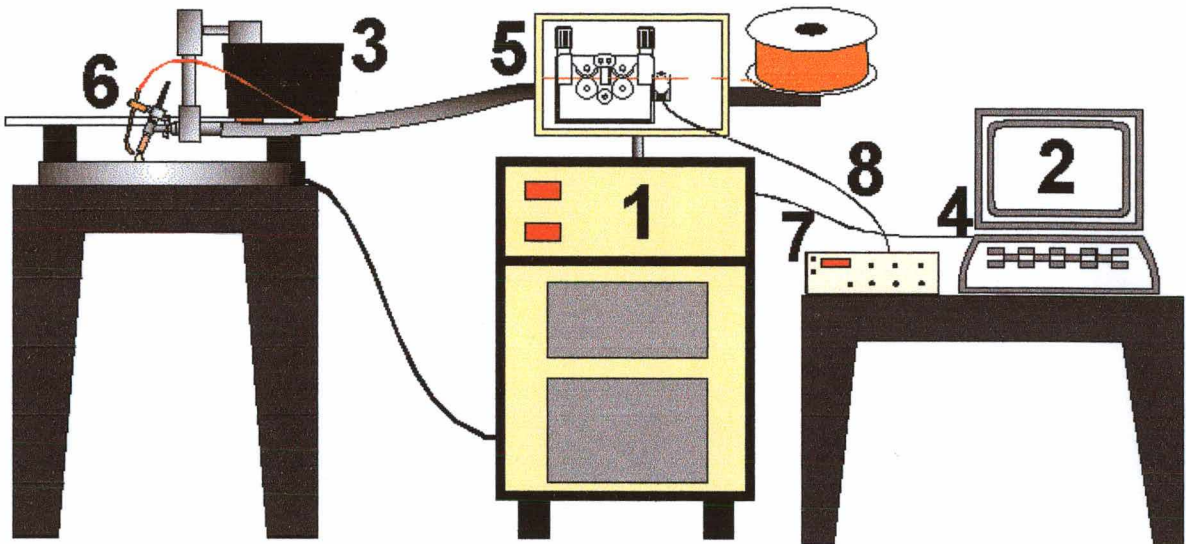


Figura 4.1 – Representação esquemática da bancada de ensaios.

#### 4.2.1 Fonte de soldagem “MTE DIGITEC 300”

Todos os ensaios foram realizados com o emprego da fonte de soldagem multiprocesso, microprocessada e transistorizada com chaveamento no secundário “MTE DIGITEC 300”, em virtude de suas características e vantagens [18]: fácil interface homem-máquina, por meio de acionamento remoto em painel de comando digitalizado e fácil interligação com sistemas automatizados.

A Figura 4.2 mostra uma fotografia do equipamento e a Tabela 4.1 exibe suas características técnicas.

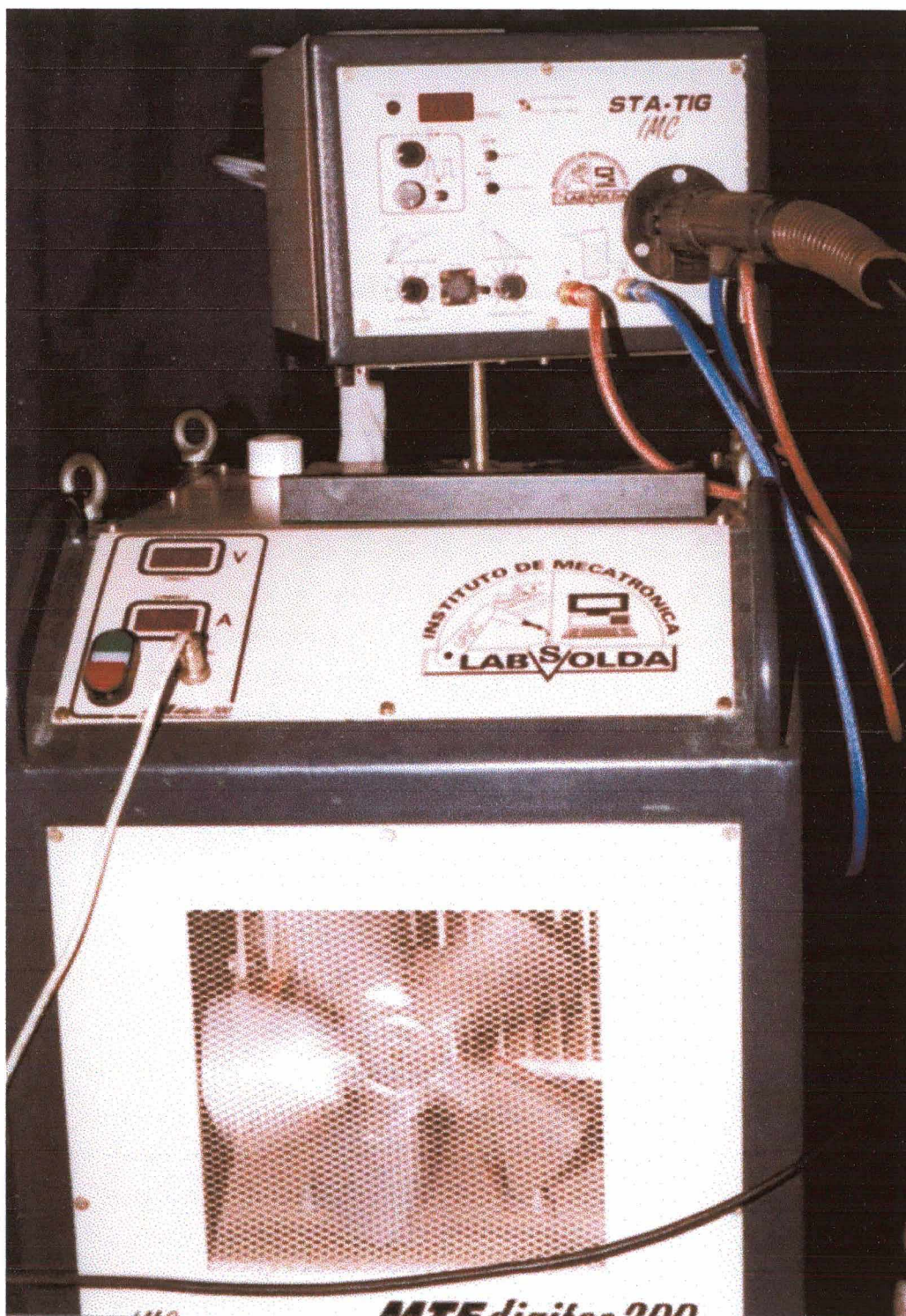


Figura 4.2 – Fonte de Soldagem “MTE DIGITEC 300”, com o cabeçote alimentador de arame “STA – TIG”.

<b>Tipo de corrente</b>	<b>Continua (constante ou pulsada)</b>
<b>Corrente Nominal</b>	<b>300 A</b>
<b>Tensão de alimentação</b>	<b>220, 380 ou 440 V Trifásico</b>
<b>Tensão em vazio</b>	<b>64 V</b>
<b>Potência máxima consumida</b>	<b>12 kW</b>
<b>Fator de potência</b>	<b>0,94</b>
<b>Dimensões</b>	<b>0,5 x 0,6 x 0,9 m</b>
<b>Peso</b>	<b>150 kg</b>
<b>Circuito de arrefecimento</b>	<b>3,5 litros de água destilada</b>

Tabela 4.1 - Características técnicas da fonte de soldagem “MTE DIGITEC 300”.

#### 4.2.2 Softwares “OSCILOS” e “CALIGEN”

O “OSCILOS” é um “software” desenvolvido no LABSOLDA que serve para monitoramento do processo de soldagem, permitindo simular, na tela do microcomputador, um osciloscópio digital a partir de sinais de tensão obtidos da fonte de soldagem e enviados à placa de aquisição de dados “INTERDATA 3”, acoplada ao computador. Este “software” permite representar os sinais recebidos, na forma de oscilogramas de tensão e corrente com “ripple” da fonte (oscilação do sinal) de 1 V e 4 A, respectivamente. Estes dados foram obtidos através de ensaios realizados com o objetivo específico de se determinar o valor do “ripple” da fonte para cada oscilograma. Para tanto, utilizou-se uma corrente contínua constante de valor conhecido (padrão de corrente) e mediu-se, para um intervalo de tempo de 2 segundos, o valor da oscilação máxima do sinal obtido (ripple da fonte de soldagem), tanto para o oscilograma de tensão, quanto de corrente. Nas medições empregou-se uma frequência de aquisição de 5 kHz.

O “CALIGEN” é um “software”, também desenvolvido no LABSOLDA, que permite realizar a calibração e determinar a função de transferência do sistema de medição de corrente e tensão.

#### 4.2.3 “TARTÍLOPE V1”

É um sistema microcontrolado de deslocamento da tocha, que permite o posicionamento e a movimentação automática da mesma na direção da soldagem, possibilitando a realização de soldas automáticas com movimentos lineares da tocha programáveis no teclado ou via computador (Fig. 2.1).

#### 4.2.4 “INTERDATA 3”

É uma placa de aquisição de dados responsável pela interface entre a fonte de soldagem e o microcomputador (Fig. 4.3).

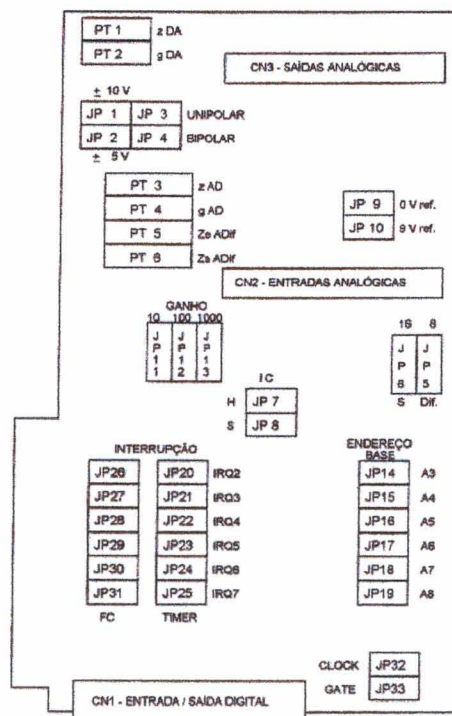


Figura 4.3 – Desenho esquemático da placa “INTERDATA 3”.

#### 4.2.5 Cabeçote alimentador automático de arame “ STA TIG ”

Este equipamento é um sistema automático de alimentação de arame (Fig. 3.1) voltado especificamente para a aplicação na soldagem pelo processo TIG com adição automática de metal. Entretanto, possui características distintas daqueles já existentes para o processo MIG/MAG.

Uma das diferenças entre estes dois equipamentos está no mecanismo de partida e de parada da alimentação do arame. No processo MIG/MAG o arame-eletrodo flui internamente ao bocal da tocha, independente da existência de corrente. O movimento do arame é iniciado apenas pelo acionamento de um botão na tocha, de modo que a abertura do arco voltaico se dá no instante em que o arame-eletrodo toca a peça, dando início a um curto-circuito.

Em aplicações envolvendo o processo TIG o metal de adição não é um eletrodo. Além disso, sua fusão depende do estabelecimento de uma fonte de calor. Portanto, diferentemente do processo MIG/MAG, o arame só poderá ser movimentado após o arco voltaico já ter sido estabelecido entre o eletrodo não consumível de tungstênio e a peça a ser soldada.

Quanto ao sistema automático de alimentação de arame (Cabeçote STA-TIG) foi imposta, para a concepção de projeto, a condição de que para se dar início à soldagem o arame deveria iniciar seu movimento somente após a abertura do arco voltaico, com um tempo de atraso ajustado por uma rampa de subida da velocidade de alimentação do arame (Fig. 4.4).

Da mesma forma, no final da soldagem deve-se atuar na velocidade do arame, de modo a evitar sua colagem na peça de trabalho. Isto é possível através do ajuste de uma rampa de descida da velocidade de alimentação do arame que fixará um tempo de atraso entre o término do arco voltaico e a velocidade do arame. O ajuste dessas duas rampas (aceleração e desaceleração) é feito diretamente por potenciômetros localizados no painel do equipamento (Fig. 4.4).



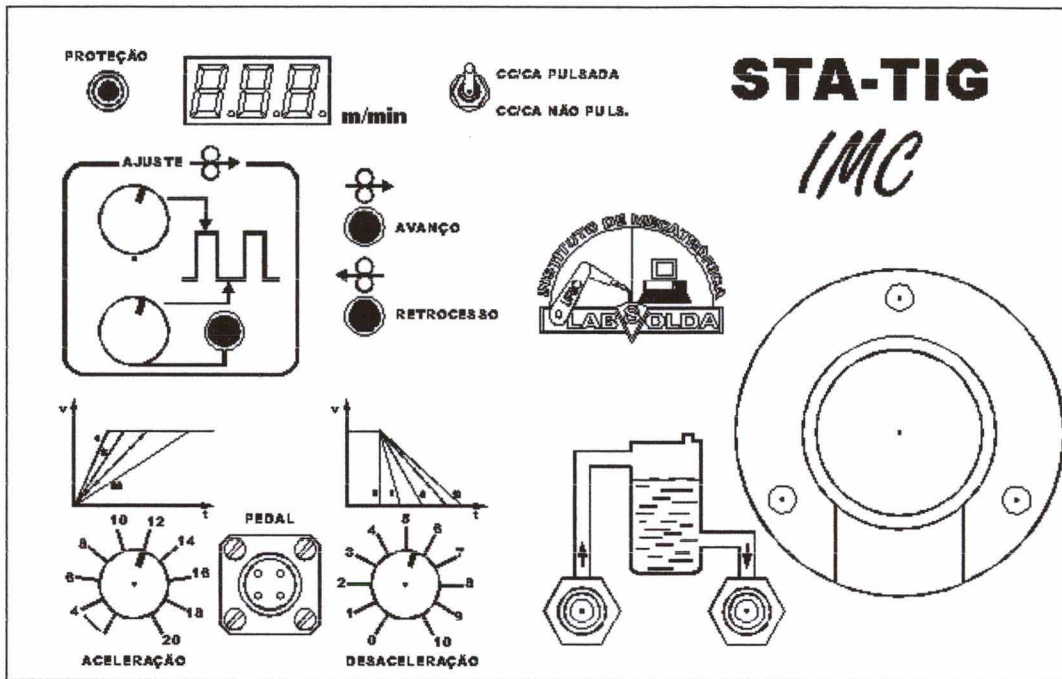


Figura 4.4 - Desenho esquemático do painel frontal do Cabeçote STA-TIG.

Além disso, este equipamento permite ser usado em qualquer dos quatro modos de soldagem para o processo TIG (corrente contínua constante, corrente contínua pulsada, corrente alternada retangular e corrente alternada retangular pulsada). No modo corrente constante, o arame deve ser alimentado com uma velocidade constante, ajustada pelo soldador. No modo corrente pulsada o arame deve ser alimentado de forma pulsada, assumindo valores de pulso e de base em sincronismo com a corrente de soldagem.

#### 4.2.6 Tocha TIG adaptada

Na soldagem TIG com alimentação automática de arame foi utilizado um dispositivo acoplado externamente à tocha, composto, basicamente, por um pequeno suporte regulável para possibilitar o ajuste do posicionamento do arame na poça de fusão (Fig. 3.2).

#### 4.2.7 “MVA”

É um equipamento, indicado para realizar medições de velocidade média do arame. Utiliza um transdutor digital através do qual o arame gira um rolete do elemento sensor (Fig. 4.5). Este rolete gira um disco com ranhuras bem definidas por onde passa um feixe de luz gerado por um diodo. Do outro lado do disco é colocado um diodo receptor, que cada vez que receber o feixe luminoso, gerará um sinal de tensão em seus terminais. Assim, pode-se medir a frequência de pulsos de tensão na saída do diodo receptor e estabelecer uma relação entre esta frequência e a velocidade do arame.

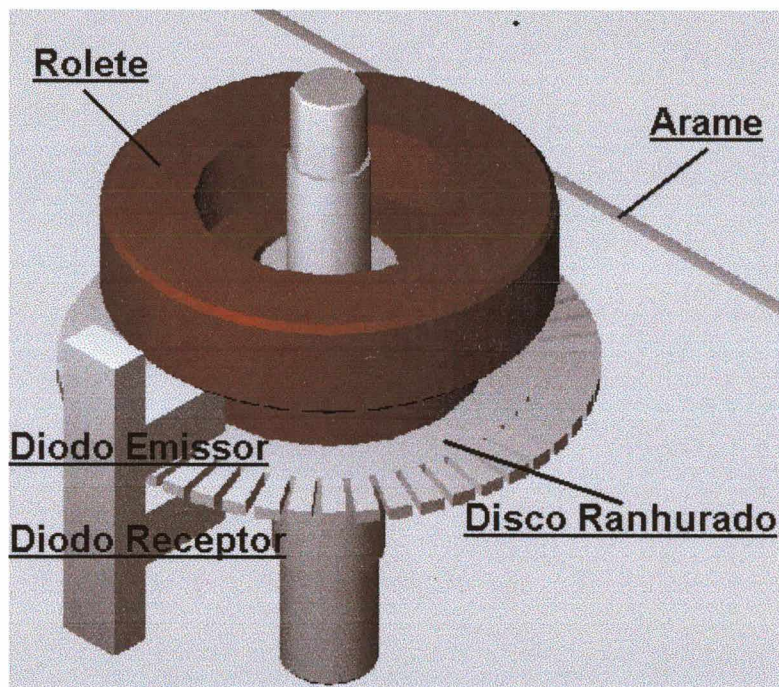


Figura 4.5 – Desenho esquemático do transdutor digital.

#### 4.2.8 Tacogerador

É um dispositivo indicado para realizar medições de velocidade instantânea do arame (Fig. 4.6). Utiliza um transdutor analógico que consiste num gerador elétrico que gira com o avanço do arame de soldagem. Este transdutor impõe uma tensão em seus terminais proporcional à sua

rotação. Medindo-se esta tensão, pode-se calcular a velocidade com que o arame está sendo alimentado.

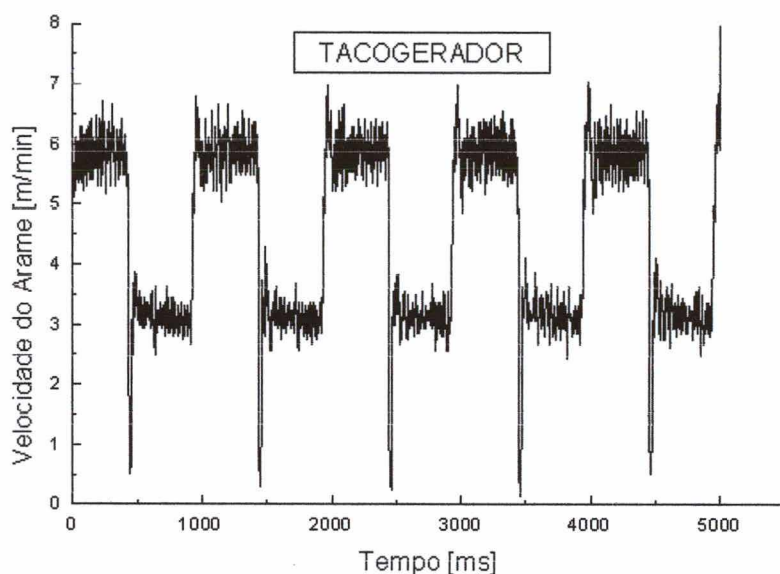


Figura 4.6 – Resposta dinâmica medida pelo transdutor analógico.

## 4.3 Metodologia

### 4.3.1 Introdução

Um dos objetivos deste trabalho é o estudo do processo na posição sobrecabeça, principalmente por se tratar de uma posição de soldagem pouco explorada pela literatura técnica disponível. Esta escassez de informação existe pelo fato de que, por se tratar de uma posição de soldagem desfavorável, a problemática inerente a esta posição torna-se um obstáculo, que resulta num considerável aumento da dificuldade de realização destes ensaios, em relação aos executados na posição plana. Devido a esta dificuldade, iniciou-se pela posição plana, para obter informações relevantes e necessárias à realização dos ensaios na posição sobrecabeça, com aplicação específica na soldagem de reparos de turbinas hidráulicas erodidas por cavitação.

Foram realizadas basicamente as seguintes etapas:

- Montagem da bancada de ensaios (Fig. 4.1);
- Calibração do sistema de medição de velocidade do arame ( MVA e tacogerador );
- Calibração do sistema de medição de corrente e tensão (OSCILOS), utilizando como instrumento padrão: o amperímetro modelo ITT MX 12005 para a corrente, o multímetro digital modelo TEKTRONIX DM 252 para a tensão, e o “software” CALIGEN para determinar a função de transferência do sistema;
- Confeção e limpeza dos corpos-de-prova. Nesta etapa a superfície a ser soldada era esmerilhada e depois limpa;
- Realização das soldagens propriamente ditas;
- Confeção dos oscilogramas e gráficos obtidos;
- Análise dos resultados obtidos, com base nos oscilogramas e nos aspectos visuais dos cordões.

#### **4.3.2 Ensaio em posição plana**

O enfoque central da metodologia aplicada está na medição da taxa de deposição do metal de adição do processo TIG alimentado automaticamente e a comparação dos resultados com outros obtidos de ensaios pelo Processo MIG/MAG. Foram testados os dois modos de alimentação do arame ( pela frente e por trás do arco ).

##### **a) Realização dos ensaios**

Nesta etapa procurou-se determinar a melhor faixa de utilização das variáveis do processo que pudesse garantir a correta alimentação do arame, sem perda da qualidade do cordão depositado. Determinou-se também os valores mínimos, máximos e ideais da velocidade de alimentação do arame, numa faixa de corrente média entre 110 A e 290 A. Todos os ensaios

foram realizados adotando-se duas alturas do arco (3 mm e 5 mm) e três velocidades de soldagem: 10 cm/min (0,0017 m/s), 20 cm/min (0,0033 m/s) e 30 cm/min (0,005 m/s). Além destes ensaios citados acima, foram realizados mais dois, a título de verificação, com comprimentos de arco de 10 mm (arco longo) e abaixo de 2 mm (arco curto).

Foram realizados ensaios preliminares com o objetivo de determinar os efeitos do posicionamento do arame em relação à poça fundida: arame alimentado pela frente do cordão soldado e arame alimentado por trás do cordão. Os primeiros resultados obtidos mostraram problemas com a alimentação por trás do cordão, conforme pode ser constatado pela leitura do Capítulo V desta dissertação. Por esta razão, adotou-se para o resto dos ensaios a alimentação do arame pela frente do cordão depositado.

#### **4.3.3 Ensaio em posição sobrecabeça**

##### **a) Introdução**

Foram realizados experimentos utilizando-se, tanto corrente contínua constante (CCC), quanto corrente contínua pulsada (CCP). Os resultados obtidos em cada modalidade da corrente de soldagem foram comparados, com o intuito de se avaliar os benefícios, ou não, do uso da corrente pulsada. Todos os experimentos foram realizados com o intuito de obter a melhor condição de alimentação de arame, tomando-se como critério de avaliação, desta condição, o oscilograma de tensão obtido durante o ensaio e o aspecto visual do cordão.

Em soldagem TIG pulsada com alimentação automática de arame, é grande o número de parâmetros envolvidos, (além dos parâmetros de pulso, existem os parâmetros de alimentação do arame), o que torna difícil realizar um estudo completo da influência de todos estes parâmetros sobre a geometria do cordão soldado.

Para simplificar a análise dos resultados deste estudo, foi preciso adotar critérios bem definidos que pudessem incorporar, pelo menos, a influência dos parâmetros de pulso mais significativos na variação da geometria do depósito.

Considerando esta linha de raciocínio, pôde-se eleger alguns parâmetros de pulso que certamente tiveram uma parcela significativa de contribuição na variação da geometria do cordão depositado. A partir daí pôde-se determinar o grau de influência destes parâmetros e direcionar o estudo para aqueles mais significativos.

## **b) Objetivo**

Este ensaio também teve como objetivo principal a obtenção de cordões com elevada taxa de deposição e “geometria controlada”, além do estudo e a análise do inter-relacionamento das variáveis mais significativas envolvidas na soldagem pelo processo TIG pulsado com alimentação automática de arame e a criação de um modelo matemático capaz de prever, tanto a geometria do cordão, quanto a velocidade de alimentação do arame indicada para as condições de soldagem preestabelecidas, visando sua aplicação em estudos que tratam do processo com Controle Sinérgico destas variáveis.

O propósito de cada experimento realizado é investigar os efeitos de cada fator em um intervalo preestabelecido, dado por níveis dos fatores, procurando maximizar a informação destes fatores sobre a resposta.

## **c) Procedimento experimental**

O projeto fatorial é a opção mais econômica na execução de um experimento, quando o número de variáveis controláveis é elevado. Por isso que os experimentos fatoriais são bastante usados para descrever o comportamento empírico dos processos de soldagem.

Portanto, como procedimento estatístico, foi utilizado um experimento fatorial completo à 3 variáveis e 3 níveis ( $3^3$ ) e, para a análise dos resultados obtidos, o algoritmo de Yates.

O número total de experimentos é função do número de parâmetros de controle e do número de níveis a serem pesquisados. Como são 3 parâmetros a 3 níveis, são necessários 27 experimentos para se ter o estudo completo de todos os resultados possíveis dentro da faixa preestabelecida para cada parâmetro de controle.

Portanto, foram realizados 27 experimentos por simples deposição, em corpos de prova de aço ABNT 1020, na posição sobrecabeça, utilizando-se a bancada de ensaios mostrada na Figura 4.11. O metal de adição utilizado foi o arame tubular “CAVITEC”, com diâmetro de 1.2 mm.

O ensaio realizado em posição plana fornece valores ideais para a velocidade do arame, em função da corrente média de soldagem utilizada. Portanto, para uma determinada velocidade de soldagem, ao se fixar uma corrente de soldagem, tem-se uma velocidade ideal para a alimentação do arame. Além da observação visual, o aspecto do oscilograma de tensão auxilia bastante na obtenção desta condição ótima de soldagem. Estes resultados servem, portanto, como ponto de partida para o ensaio em posição sobrecabeça. O mesmo raciocínio pode ser estendido ao uso da corrente pulsada.

Todavia, observa-se que alguns resultados não podem ser aceitos, pois não atendem requisitos de qualidade estabelecidos em Normas de Soldagem.

Diante destas observações, se faz necessário a adoção de critérios para se conseguir restringir os resultados apenas àqueles que atendam aos requisitos de qualidade do cordão depositado. Portanto, foram adotados dois critérios distintos para aceitação dos depósitos obtidos:

1. O primeiro critério procura obter uma uniformidade da largura e do reforço do cordão, minimizando os defeitos laterais ao longo de toda extensão do cordão, decorrentes da frequência de pulsação inadequada para determinada velocidade de soldagem e

corrente de pulso (Fig. 4.7). A fim de garantir uma boa continuidade ao longo da extensão do cordão, a solda deve progredir como uma série de poças sucessivas, com sobreposição dos pulsos superior a 60% [13]. A Figura 4.8 representa esquematicamente esta condição.

2. O segundo critério busca restringir a ocorrência de depósitos com convexidade excessiva (Fig. 4.9). Na posição sobrecabeça, um parâmetro indicativo desta convexidade é a razão entre a altura do reforço e a largura do cordão ( $h_r / L$ ). O limite ( $h_r / L \leq 0,5$ ), para depósitos de revestimento, foi definido experimentalmente em ensaios preliminares (Fig. 4.10).

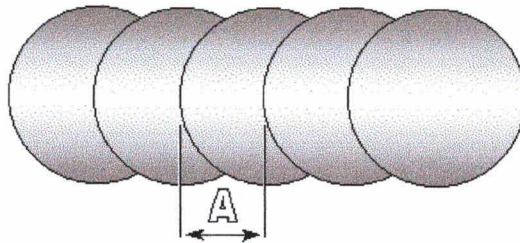


Figura 4.7 – Representação esquemática de cordão com freqüência de pulsação incorreta (sobreposição de 50 %).

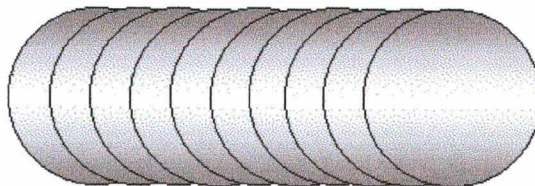


Figura 4.8 – Representação esquemática de cordão com freqüência de pulsação adequada (sobreposição de 80 %).



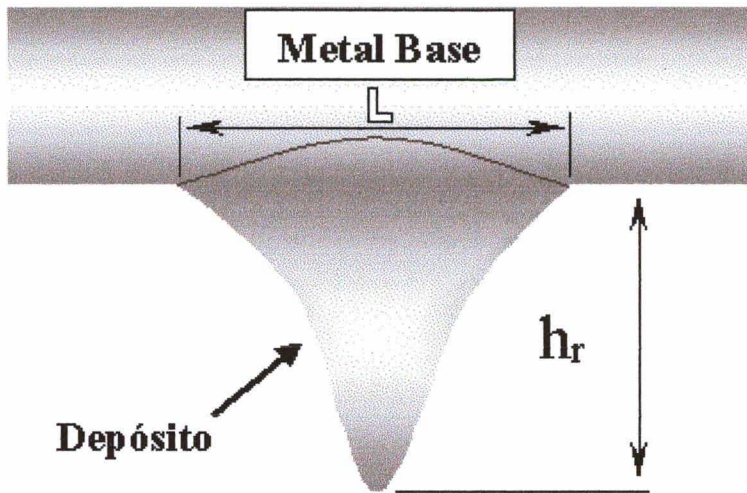


Figura 4.9 - Representação esquemática de depósito muito convexo, na posição sobrecabeça.

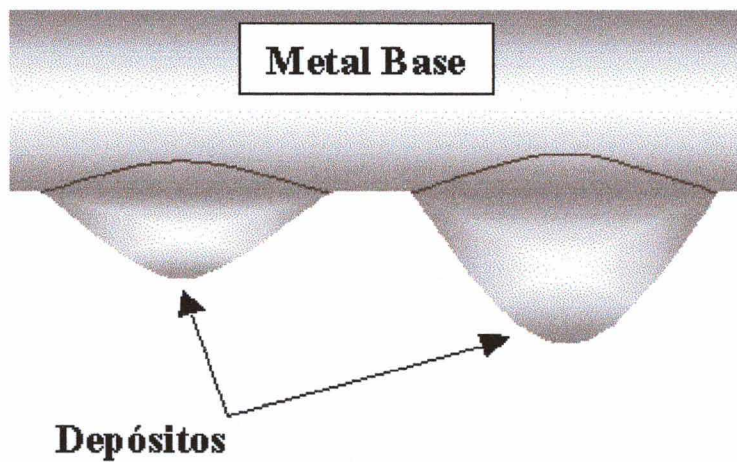


Figura 4.10 - Representação esquemática de depósitos com convexidade adequada, na posição sobrecabeça.

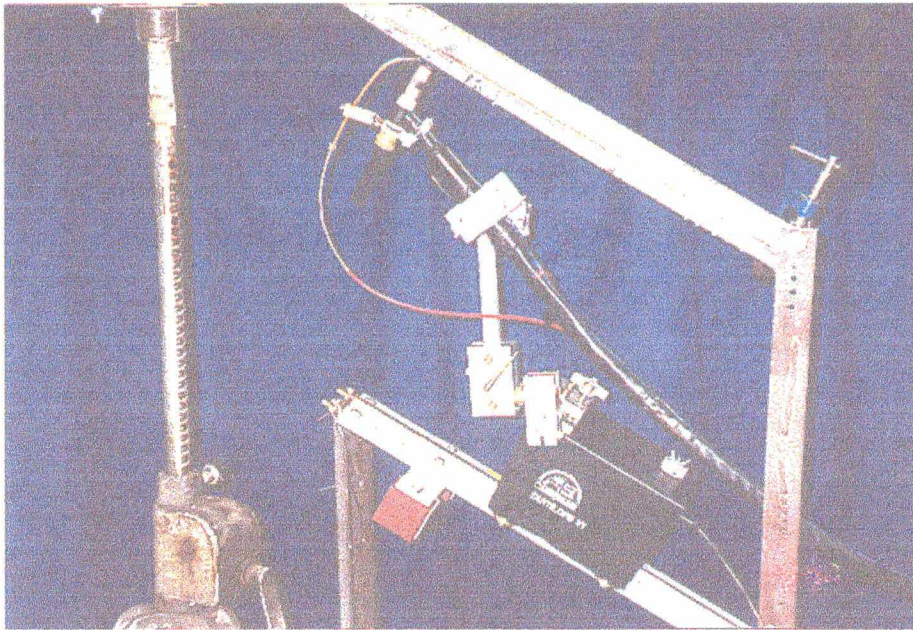


Figura 4.11 – Bancada de ensaios para a posição sobrecabeça.

A partir da aplicação destes dois critérios, consegue-se depurar o modelo matemático, restringindo-o apenas aos experimentos que realmente possam ter alguma aplicação prática.

A Tabela 4.2 mostra os 27 experimentos realizados, juntamente com a aplicação dos dois critérios já definidos. A sobreposição (  $S$  ) foi calculada utilizando-se a expressão [2.3]. Os ensaios marcados a carimim (e com asterisco) significam aqueles que foram rejeitados pelo menos por um dos critérios citados acima. Portanto, restam apenas 13 ensaios que satisfazem os critérios estabelecidos.

A partir daí, foi possível determinar um modelo matemático capaz de representar todos os resultados experimentais, aceitos segundo os critérios previamente estabelecidos.

## 4.4 Parâmetros

### 4.4.1 Posição plana

- Eletrodo de tungstênio com 2% de tório, diâmetro de 3,2 mm e ângulo de ponta de 45°;

- Ângulo de ataque do arame em relação à peça de  $45^\circ$  (Fig. 4.12);
- Arame maciço de aço carbono em bobina, com diâmetro de 1,2 mm;
- Dimensões dos corpos-de-prova: chapas de aço carbono 1020 com 25,4 mm de espessura, 50,0 mm de largura e 1,2 m de comprimento;
- Corrente média dentro da faixa: 110 à 290 A;
- Distância eletrodo-peça ( altura do arco ): 3,0 mm e 5,0 mm;
- Velocidades de soldagem: 10,0 cm/min, 20,0 cm/min e 30,0 cm/min;
- Velocidade de alimentação do arame dentro da faixa: 1,0 à 7,5 m/min;
- Vazão de gás de proteção (argônio): 12,0 l/min;
- Ângulo de ponta: 45 graus.

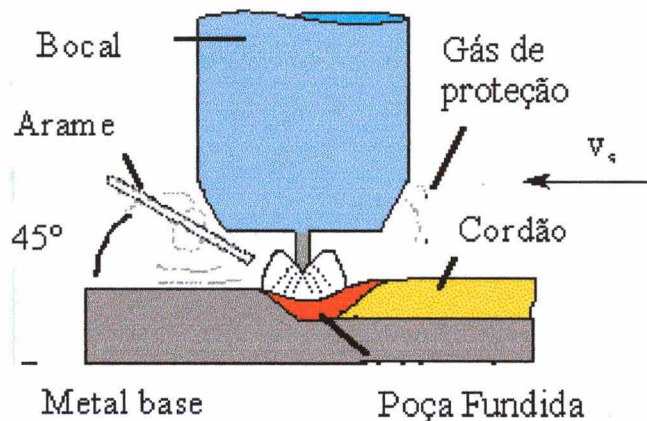


Figura 4.12 – Desenho esquemático mostrando o correto posicionamento do arame.

#### 4.4.2 Posição sobre-cabeça

##### a) Introdução

Segundo STREET and LUCAS [1, 2] os parâmetros recomendáveis para a soldagem TIG pulsada são:

1. A corrente de pulso mínima a ser usada é determinada principalmente pela condutibilidade térmica do material, sendo da ordem de 150 A para corpos de prova em aço carbono comum com espessura mínima de 12,5 mm. Esta corrente é a mínima necessária para formar uma poça fundida consistente e permitir seu deslocamento juntamente com o arco voltaico formado, ao longo de toda extensão do cordão soldado. Este fato norteou a escolha dos níveis adotados para a corrente de pulso durante a realização dos ensaios, (160, 226 e 320) A;
2. A corrente de base deve ser ajustada num valor pequeno, o suficiente para manter um arco estável e permitir a rápida dissipação de calor na peça. Quanto menor a corrente de base, para uma corrente de pulso fixa, maior será o gradiente de temperatura na peça, conseqüentemente, maior também será a quantidade de calor dissipado na peça por unidade de tempo [12].

Deve-se observar que esta condição favorece a soldagem na posição sobrecabeça, pois a quantidade elevada de calor dissipado na peça por unidade de tempo tende à aumentar a velocidade de resfriamento da poça fundida, solidificando-a mais rapidamente e reduzindo, assim, a possibilidade de ocorrer o escorrimento do cordão depositado.

Por questões de limitação do Cabeçote Alimentador Automático de Arame (STA – TIG), que necessita de uma corrente mínima de 34 A para poder dar início a alimentação automática do arame, foi adotada uma corrente de base igual a 40 A.

Quanto ao tempo de base, este pode ser até três vezes superior ao tempo de pulso, quando se tem espessuras elevadas [12]. Todavia, neste trabalho, para facilitar a realização dos ensaios e análise dos resultados, adotou-se a igualdade entre os tempos de base e de pulso.

ensaio	$v_s$ (cm/min)	$t_p$ (s)	$I_p$ (A)	$v_b$ (base) (m/min)	$v_p$ (pico) (m/min)	$v_a$ (média) (m/min)	$h_r/L$	A (mm)	S (%)
1	10	0,2	160	0,4	1,5	0,95	0,49	1,0	84,1
2	10	0,2	226	0,5	1,9	1,20	0,49	1,0	83,6
3	10	0,2	320	0,5	2,5	1,50	0,21	1,0	88,9
4	10	0,6	160	0,5	2,1	1,30	0,49	2,0	66,1
5	10	0,6	226	0,5	2,7	1,60	0,49	2,0	71,8
6	10	0,6	320	0,5	3,4	1,95	0,23	2,5	72,8
7*	10	1,0	160	0,5	2,5	1,50	0,64*	3,5	39,7*
8	10	1,0	226	0,5	3,5	2,00	0,34	3,5	60,2
9*	10	1,0	320	0,5	3,8	2,15	0,30	--	--
10	20	0,2	160	0,4	1,3	0,85	0,49	1,5	68,1
11	20	0,2	226	0,5	1,6	1,05	0,49	1,5	71,7
12*	20	0,2	320	0,5	2,1	1,30	0,51*	--	--
13	20	0,6	160	0,5	1,7	1,10	0,44	2,0	60,0
14	20	0,6	226	0,5	2,1	1,30	0,39	2,5	61,0
15*	20	0,6	320	0,5	2,5	1,50	0,35	--	--
16*	20	1,0	160	0,5	1,9	1,20	0,57*	4,0	4,8*
17*	20	1,0	226	0,5	2,8	1,65	0,41	5,0	21,9*
18*	20	1,0	320	0,5	3,0	1,75	0,60*	--	--
19	30	0,2	160	0,4	1,0	0,70	0,44	1,5	61,5
20	30	0,2	226	0,5	1,9	1,20	0,42	1,5	66,7
21*	30	0,2	320	0,5	3,2	1,85	0,47	--	--
22*	30	0,6	160	0,5	2,3	1,40	0,64*	3,5	10,3*
23*	30	0,6	226	0,5	3,1	1,80	0,37	4,0	29,8*
24*	30	0,6	320	0,5	4,1	2,30	0,22	6,0	34,8*
25*	30	1,0	160	0,5	2,5	1,50	0,49	8,0	-70,2*
26*	30	1,0	226	0,5	3,5	2,00	0,29	8,0	-15,9*
27*	30	1,0	320	0,5	4,5	2,50	0,20	8,0	9,1*

Tabela 4.2 – Ensaio realizados com aplicação dos critérios preestabelecidos.

## b) Fatores fixos

- Tipos de corrente: Corrente Contínua Constante (CCC), dentro da faixa de 80 a 190 A e Corrente Contínua Pulsada com polaridade negativa (CCP);
- Corrente de Base:  $I_b = 40$  A;
- Eletrodo de Tungstênio com 2% de Tório e diâmetro de 3,2 mm;

- Gás de Proteção: Argônio com vazão de 15 l/min;
- Distância Eletrodo-Peça: 5 mm;
- Espessura da Chapa: 19 mm;
- Fator de Ciclo:  $\theta = \text{tempo de pulso} / \text{período} = 0.5$  (  $t_p = t_b$  );
- Ângulo de ponta: 45 graus;
- Arame “CAVITEC ” com diâmetro de 1,2 mm (arame tubular com pó metálico).

### c) Variáveis

- Velocidade de Soldagem: (10, 20 e 30) cm/min;
- Corrente de Pulso: (160, 226 e 320) A;
- Tempo de Pulso: (0.2, 0.6 e 1.0) s.

### d) Respostas

- Largura do Cordão (L);
- Altura do Reforço do Cordão ( $h_r$ );
- Velocidade de Alimentação do Arame ( $v_a$ );
- Sobreposição (S).

## CAPÍTULO V

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Introdução

Adota-se, muitas vezes critérios subjetivos, por não existirem critérios quantitativos que possuam validade comprovada. Muitos trabalhos da literatura técnica apresentam índices ou indicativos de estabilidade, cuja validade é restrita ou os testes que levaram a sua validação se restringem à situações específicas.

Com o objetivo de manter a coerência da metodologia aplicada, os resultados foram analisados e discutidos de acordo com a posição de soldagem de cada ensaio (plana e sobrecabeça), e comparados segundo critérios de qualidade e produtividade. Além disso, foram realizados ensaios para se determinar o melhor posicionamento do arame na poça fundida, ou seja, alimentação do arame por trás do cordão ou pela frente do mesmo.

### 5.2 Posição relativa arco-arame

Apesar de ter favorecido a molhabilidade dos depósitos, a alimentação do arame sendo realizada por trás do arco voltaico não produziu resultados satisfatórios, tanto do ponto de vista de taxa de deposição do metal de adição, quanto do ponto de vista de qualidade dos depósitos.

A Figura 5.1 mostra o aspecto dos cordões realizados na posição plana. A alimentação do arame por trás cria uma perturbação da poça fundida, dando origem a defeitos ao longo de toda a extensão do cordão, na forma de sulcos, como poros e descontinuidades longitudinais que se

assemelham à pequenas valetas (Figura 5.1). As tentativas de eliminar estes defeitos não lograram êxito. O máximo que se conseguiu foi a redução do grau de incidência deles.

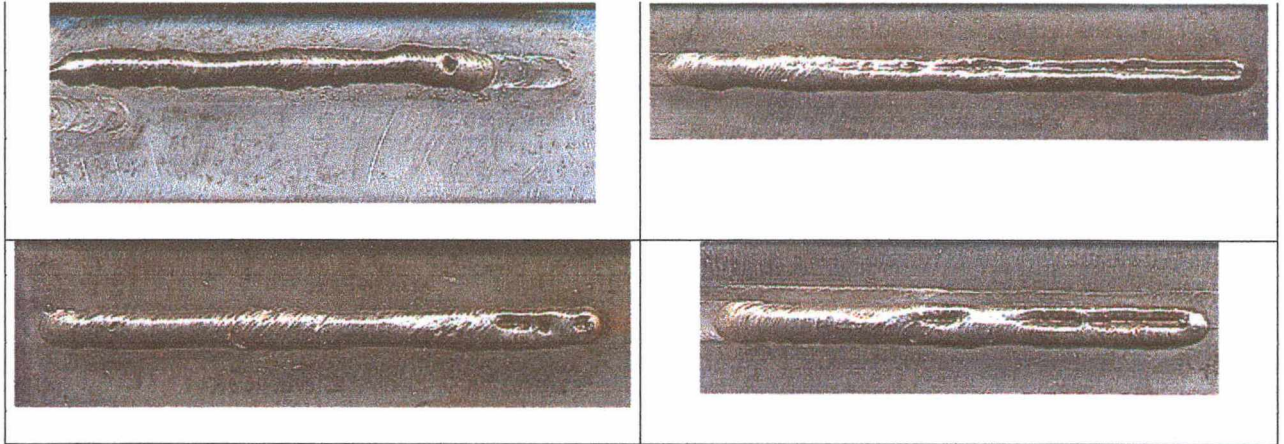


Figura 5.1 - Aspecto dos cordões realizados na posição plana, com alimentação do arame sendo realizada por trás do arco voltaico.

A literatura técnica recomenda a alimentação de arame por trás do arco somente com o uso do processo Arame Quente [7, 11]. Neste processo, como o arame sofre um pré-aquecimento antes de tocar a poça fundida, resulta num menor gradiente de temperatura no arame em fusão.

Na soldagem na posição sobrecabeça, o processo fica ainda mais sensível ao correto posicionamento do arame na poça. Embora não ocorram descontinuidades longitudinais, como na posição plana, tem-se a presença de poros ao longo de toda a extensão do cordão, conforme podem ser vistos nos cordões da Figura 5.2.

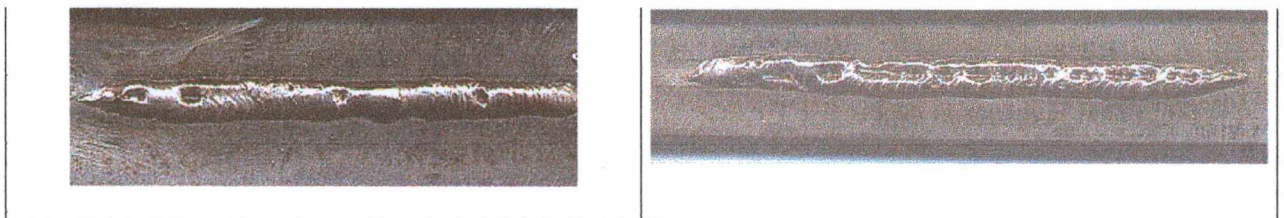


Figura 5.2 - Aspecto dos cordões realizados na posição sobrecabeça, com alimentação do arame sendo realizada por trás do arco.



A Figura 5.3 mostra dois cordões realizados em posição plana e com os mesmos parâmetros e variáveis de soldagem. O cordão “A” foi produzido com o arame alimentado pela frente do arco e o cordão “B” com o arame alimentado por trás. Nota-se nitidamente que a alimentação pela frente resulta em melhor aspecto visual do cordão.

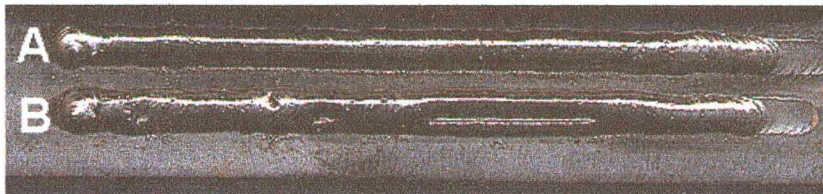


Figura 5.3 - Cordões realizados em posição plana e com os mesmos parâmetros de soldagem.

A) Alimentação pela frente do arco – B) Alimentação por trás.

Todos estes fatos levaram à escolha do posicionamento do arame pela frente do arco voltaico, confirmando o que recomenda a literatura técnica para o processo Arame Frio [ 6, 10].

### 5.3 Posição plana

A estabilidade do arco elétrico em soldagem TIG foi inicialmente estudada para avaliar o desempenho do processo e comparar os resultados obtidos. Seu conceito é muitas vezes aplicado subjetivamente. É comum este critério ser tratado de forma macroscópica, por simples inspeção da aparência do cordão ou dos níveis de ruído, sem a utilização de qualquer aparelho ou recurso instrumental de medição. Ou seja, um arco de solda de raiz anódica constante e regularidade do cordão são indicativos de arco estável, embora esta afirmação não esteja baseada em nenhum critério cientificamente comprovado [4].

Um método de avaliar a estabilidade do arco voltaico na soldagem TIG é a partir de suas características dinâmicas, analisando o comportamento da tensão ao longo do tempo [4].

Os primeiros resultados obtidos na posição plana, com corrente contínua constante, mostraram que a velocidade de alimentação do arame exerce influência significativa sobre a

estabilidade do arco voltaico, como se pode apreciar através dos oscilogramas de tensão. Verifica-se que a velocidade ideal de alimentação do arame ocorre quando se consegue manter uma tensão estável no arco, como mostrado na Figura 5.4. Portanto, o oscilograma de tensão pode ser utilizado para extrair indicativos de estabilidade do arco.

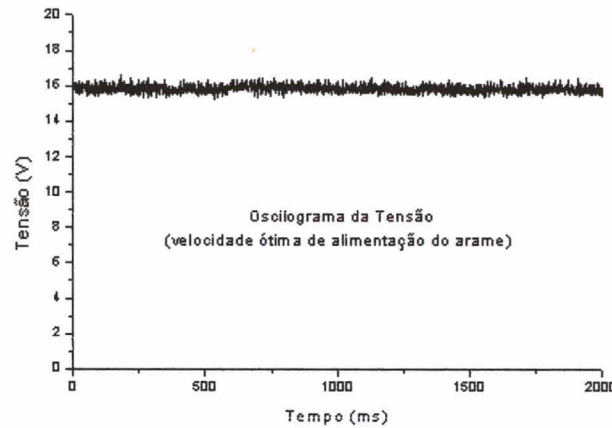


Figura 5.4 – Oscilograma de tensão na condição de arco estável.

Em contrapartida, quando o arame é alimentado com velocidades muito baixas, nota-se um ruído característico da instabilidade do arco voltaico e percebe-se visualmente que o arame não flui continuamente até a poça de fusão. Nesta condição, o oscilograma da tensão (Fig. 5.5) mostra sucessivas quedas repentinas da tensão, abaixo do valor médio, numa frequência que foi associada a de formação das gotas, decorrentes de uma condição de pouco arame em fusão.

Para se afirmar que a frequência de oscilação do valor da tensão, obtida pela análise do oscilograma de tensão, é a mesma que a frequência de formação das gotas do arame em fusão, é preciso um estudo mais detalhado do fenômeno em questão. Este estudo pode ser realizado com o auxílio de uma vídeo-câmera com elevada frequência de exposição de imagem. Assim, é possível comparar as duas frequências obtidas e, desta forma, tirar conclusões mais técnicas. Porém, este não é o objeto de estudo deste trabalho, podendo servir como um importante assunto para trabalhos futuros.

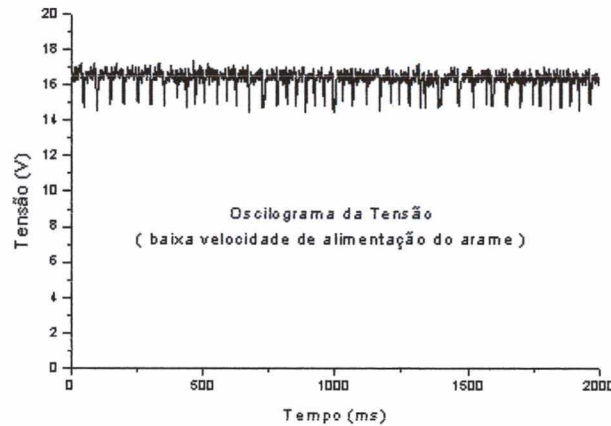


Figura 5.5 – Oscilograma da tensão na condição de alimentação insuficiente do arame.

Da mesma forma, quando o arame é alimentado com velocidades bastante superiores à velocidade ideal, observa-se nitidamente sucessivos impactos do arame, ainda no estado sólido, com a peça. Isto se traduz em sucessivos trancamentos do arame, podendo até interromper a operação do processo devido ao enrolamento do arame dentro do conduto do cabeçote alimentador. O oscilograma da tensão, apresentado na Figura 5.6, também é um indicador desta instabilidade do arco voltaico. Neste oscilograma, cada vez que o arame impacta com a peça há uma redução do valor da tensão do arco, como consequência da diminuição de seu comprimento, já que o arame passa a ser uma extensão do anodo.

Na posição plana de soldagem é possível utilizar uma altura do arco entre 3 e 7 mm, sendo 5 mm a altura mais indicada, pois nesta condição é possível garantir o correto posicionamento do arame na poça de fusão e também a continuidade de fusão do arame, através do efeito de tensão superficial da poça fundida, auxiliado pela ação da gravidade.

Quando se utiliza uma altura excessiva do arco voltaico durante a soldagem (por exemplo: 10 mm), verifica-se que a resposta em tensão indicada pelo oscilograma da Figura 5.7, aproxima-se bastante de uma onda pulsada com valores bem definidos de pulso e base, como consequência da instabilidade apresentada pelo arco nesta condição específica de soldagem.

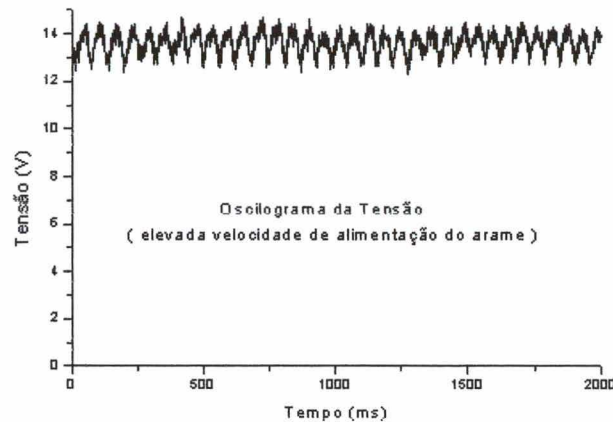


Figura 5.6 – Oscilograma da tensão na condição de alimentação excessiva do arame.

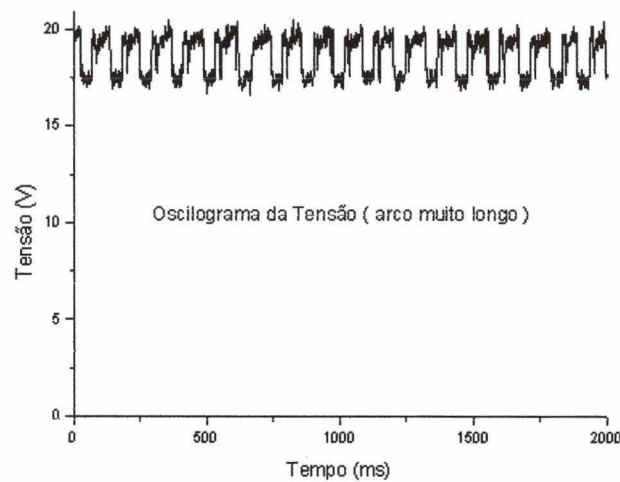


Figura 5.7 – Oscilograma da tensão na condição de arco longo.

Por outro lado, quando o eletrodo se posiciona muito próximo a peça (arco muito curto), a limitação de espaço torna difícil o correto posicionamento do arame na poça de fusão, podendo ocorrer o contato acidental do arame com a ponta do eletrodo. A instabilidade do arco, nesta condição crítica, é verificada pela oscilação do valor instantâneo da tensão de forma

aparentemente aleatória. Tal fato pode ser comprovado pela análise do oscilograma de tensão mostrado na Figura 5.8.

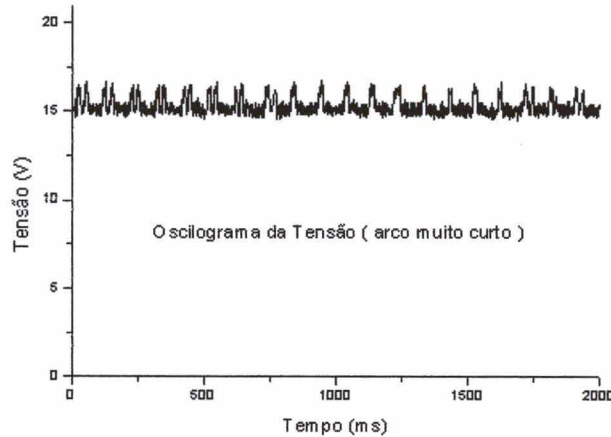


Figura 5.8 – Oscilograma da tensão na condição de arco curto.

Embora exista uma velocidade ideal, sob o ponto de vista da estabilidade do arco, para a alimentação do arame em uma determinada condição de soldagem, pequenas variações em torno deste valor, dito como ideal, não comprometem significativamente a qualidade dos resultados alcançados. Esta faixa define uma região recomendada para a operacionalidade adequada do processo sem o comprometimento significativo da qualidade desejada do cordão soldado. O limite inferior desta faixa é definido como velocidade mínima do arame e representa o valor abaixo do qual ocorre o fenômeno de elevado nível de energia do arco com pouco arame em fusão. O limite superior da faixa é definido como velocidade máxima do arame e representa o valor acima do qual ocorre o fenômeno de nível inferior de energia do arco para uma velocidade excessiva de alimentação do arame. Estes limites são apresentados nas Figuras 5.9 e 5.10.

Quando se compara a velocidade ideal de alimentação do arame em dois níveis de velocidades de soldagem (10,0 cm/min e 20,0 cm/min), os resultados obtidos mostram que o aumento da velocidade de soldagem, para uma dada potência do arco, impõe uma condição

necessária para se manter a estabilidade do arco voltaico e o equilíbrio entre a potência total dissipada no arco e a energia necessária à fusão total e contínua do arame. Esta condição está relacionada com a redução gradual da velocidade de alimentação do arame até se conseguir uma situação ideal de soldagem. A Figura 5.11 pode elucidar melhor a análise desta afirmação.

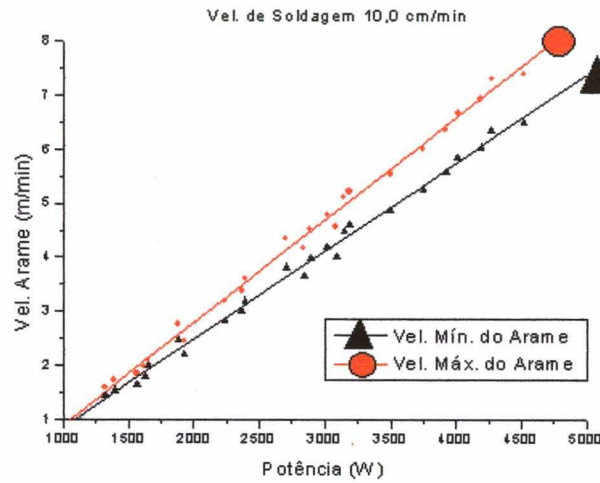


Figura 5.9 – Limites para a velocidade do arame ( $v_s = 10$  cm/min).

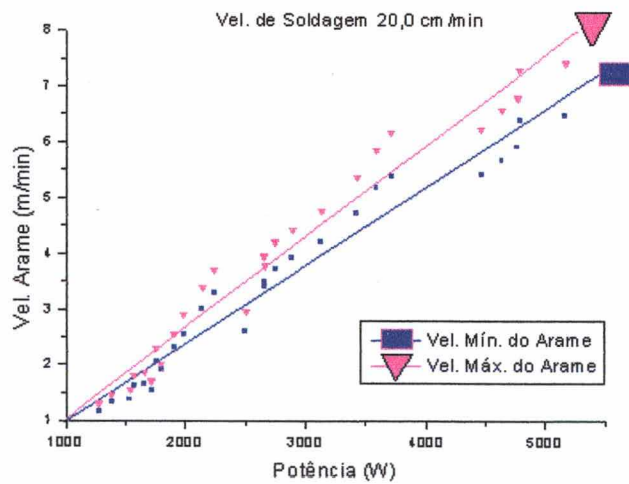


Figura 5.10 – Limites para a velocidade do arame ( $v_s = 20$  cm/min).

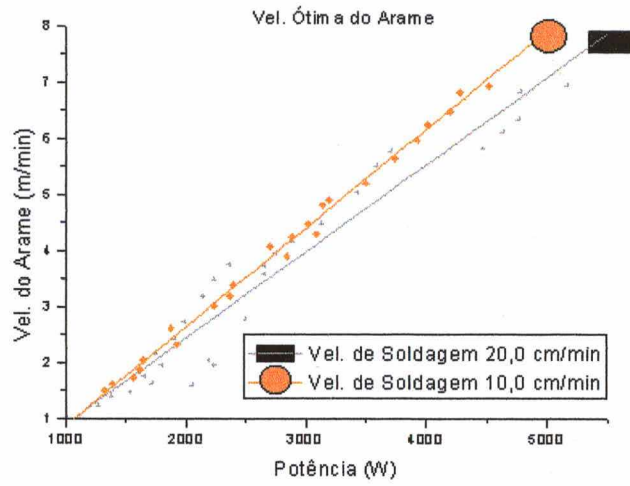


Figura 5.11 – Velocidade ótima do arame para  $v_s$  igual à 10 e 20 cm/min.

Como o aporte térmico é inversamente proporcional à velocidade de soldagem, para uma mesma potência do arco, o mesmo raciocínio pode ser estendido ao gráfico mostrado na Figura 5.12.

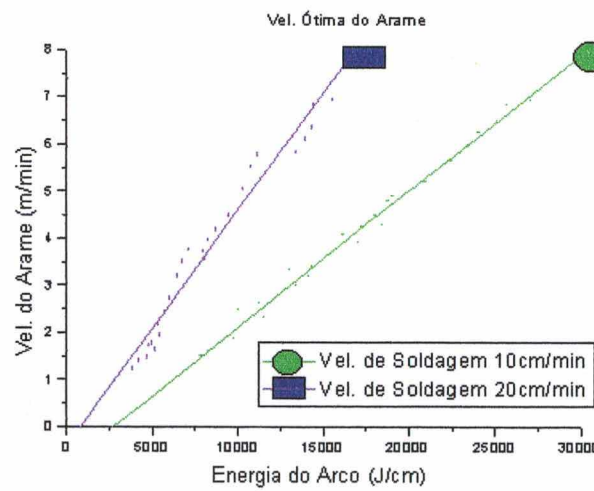


Figura 5.12 – Velocidade ótima do arame em função da energia do arco, para  $v_s$  igual à 10 e 20 cm/min.

Ao manter as mesmas condições de soldagem e variar apenas o comprimento do arco de 3 para 5 mm (isto é, dentro dos limites que levou às instabilidades do arco, que correspondem aos oscilogramas das Figuras 5.7 e 5.8), constata-se que a velocidade ideal de alimentação do arame é função da potência do arco (Fig. 5.13).

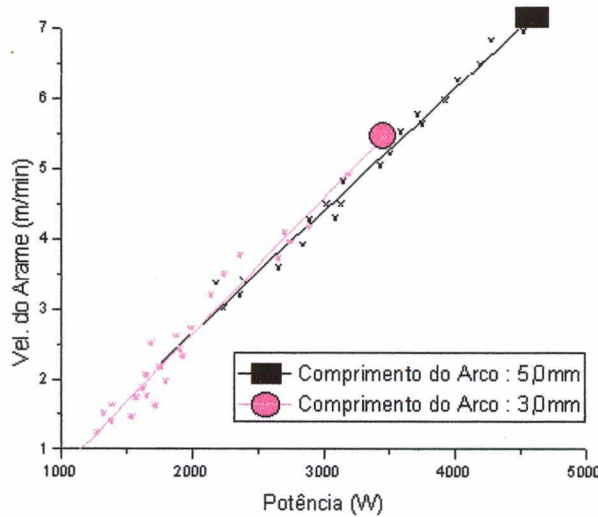


Figura 5.13 – Velocidade ótima do arame para duas alturas do arco, (3 e 5) mm.

Todos os resultados obtidos durante os ensaios mostraram a forte tendência do comportamento linear entre a potência do arco e a velocidade de alimentação do arame (ou taxa de deposição), com coeficientes de regressão linear variando entre 0,96 e 0,99, conforme pode ser visto no gráfico da Figura 5.14.

Adotando-se a corrente média de soldagem como parâmetro de comparação da taxa de deposição entre os processos TIG com alimentação automática de arame e MIG/MAG, observa-se, como esperado, que o processo MIG/MAG apresenta maior produtividade [8], conforme mostrado no gráfico da Figura 5.15. Além disto, pela tendência destas curvas, o processo TIG tende a ser, para correntes crescentes, menos favorável do que o MIG/MAG.



Entretanto, quando se relacionam essas mesmas taxas de deposição com as correspondentes potências do arco, conclui-se que, para uma mesma potência do arco, não há uma diferença significativa entre as taxas de deposição dos dois processos (Fig. 5.16).

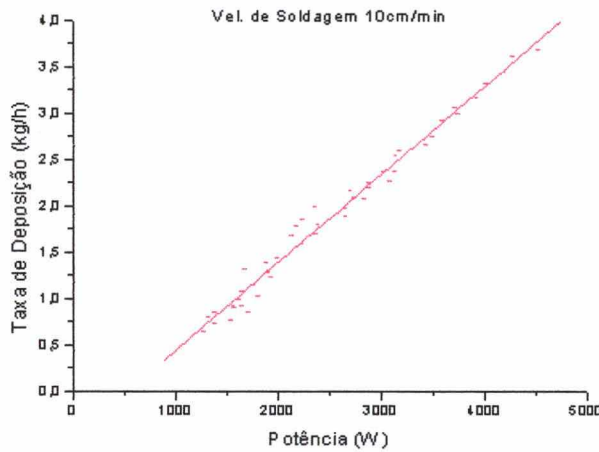


Figura 5.14 – Gráfico: taxa de deposição X potência do arco.

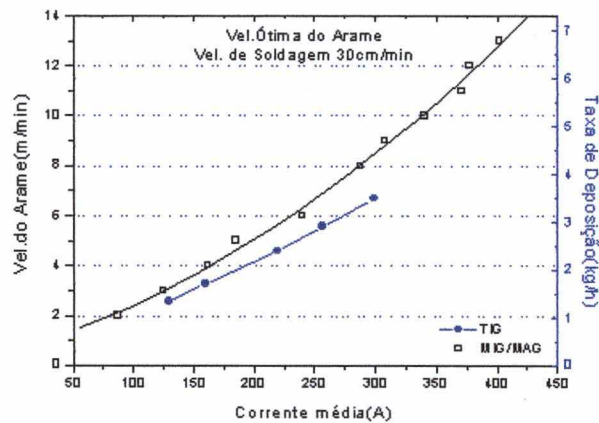


Figura 5.15 – Comparação entre os processos TIG e MIG/MAG [8], baseado na corrente média.

Há que salientar que os ensaios realizados na posição plana tiveram como fator limitante da velocidade de alimentação do arame o limite máximo disponível do equipamento utilizado (cabeçote STA TIG), que é de 7,3 m/min. Portanto, na posição plana é possível alimentar

automaticamente o arame com velocidades superiores a este valor, desde que se utilize uma corrente média de soldagem superior à 300 A (Fig.5.15).

#### 5.4 Posição sobrecabeça

Na posição sobrecabeça tem-se um fator complicador que é a ação contrária da gravidade tentando vencer o efeito favorável da tensão superficial da gota em relação à poça metálica. Como consequência, o cordão tende a ficar mais estreito e convexo (Fig. 4.9). Portanto, nesta posição de soldagem, o arco longo (acima de 7 mm) torna-se bastante problemático, propiciando uma falta de continuidade na fusão do arame e, conseqüentemente, a formação de gotas fundidas que não conseguem se manter na poça da solda e caem sobre o eletrodo de tungstênio, contaminando-o, e também sobre o bocal da tocha, dando origem a turbulências no fluxo do gás inerte e, conseqüentemente, comprometendo a eficiência da proteção do gás sobre a região aquecida da solda. Nesta situação, a tensão superficial não é suficiente para vencer a ação contrária da gravidade que atua na gota em formação.

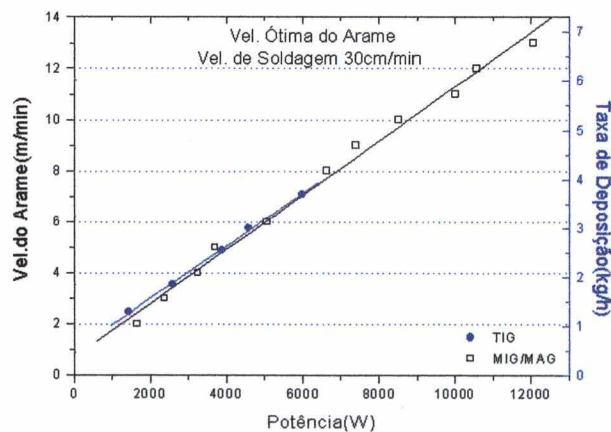


Figura 5.16 – Comparação entre os processos TIG e MIG/MAG [8] baseada na potência do arco.

Da mesma forma, o arco curto (abaixo de 3 mm) também é problemático, pois, além de dificultar o correto posicionamento do arame na poça fundida, também pode causar a extinção do

arco devido à proximidade excessiva do eletrodo com a poça em fusão, como consequência da convexidade excessiva do cordão nesta condição crítica.

Durante os ensaios realizados na posição sobrecabeça, utilizando-se corrente contínua constante (CCC), verificou-se que existem valores máximos e mínimos para a corrente média de soldagem. O valor mínimo está relacionado com a energia mínima necessária para fundir, tanto o metal base quanto o metal de adição, gerando uma poça fundida que progride com o movimento do arco voltaico (esse comportamento também ocorre na posição plana). O valor máximo está relacionado com a máxima energia possível do arco, acima da qual ocorre a tendência ao escorrimento do cordão. Ambos os valores dependem da velocidade de soldagem e da espessura do corpo de prova. Para velocidades de soldagem entre 10 e 30 cm/min e espessura da chapa de 12,5 mm, estes valores estão situados entre 80 e 190 A, conforme a análise do gráfico constante da Figura 5.18. A Tabela 5.1 mostra os parâmetros de soldagem utilizados para a realização dos ensaios “a”, “b”, “c”, “d”, “e”, “f”, “g”, “h” e “i”, na posição sobrecabeça. A Figura 5.17 mostra o aspecto visual dos cordões para estes ensaios.

<b>Cordão</b>	<b><math>v_s</math> (cm/min)</b>	<b><math>I_m</math> ( A )</b>	<b><math>v_a</math> (m/min)</b>
<b>a</b>	10	100	0,85
<b>b</b>	10	130	1,20
<b>c</b>	10	160	1,70
<b>d</b>	20	100	0,75
<b>e</b>	20	130	1,00
<b>f</b>	20	160	1,50
<b>g</b>	30	100	0,65
<b>h</b>	30	130	0,80
<b>i</b>	30	160	1,30

Tabela 5.1 - Parâmetros de soldagem utilizados para a realização dos ensaios (cavitec CCC).

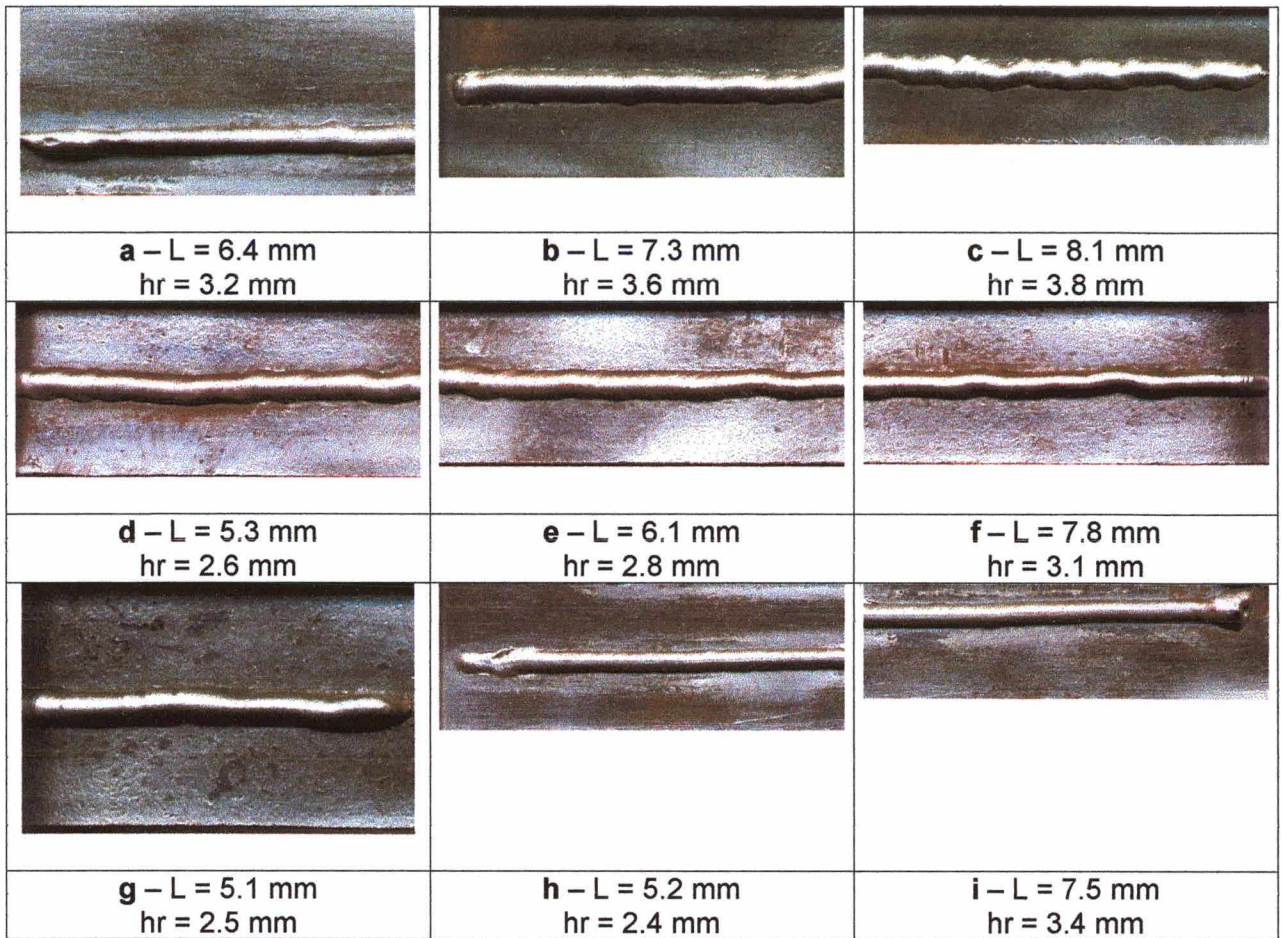


Figura 5.17 - Aspecto visual dos cordões na posição sobrecabeça ( cavitec CCC ).

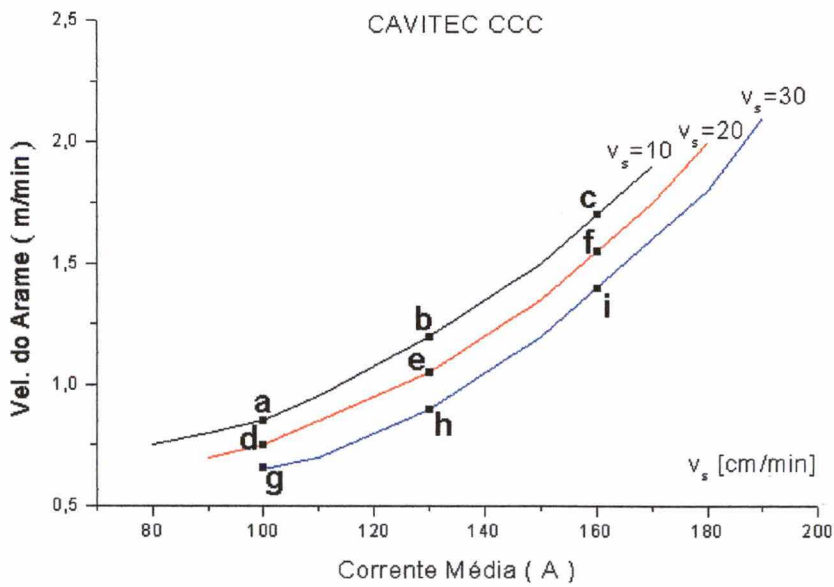


Figura 5.18 – Gráfico :  $v_a = f( I_m ; v_s )$ , na posição sobrecabeça e corrente contínua constante.






















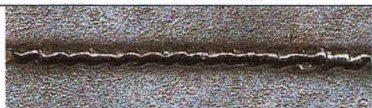
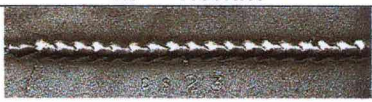




		
1 – L = 6.3mm hr = 3.1mm	2 – L = 6.1mm hr = 3.0mm	3 – L = 9.0mm hr = 1.9mm
		
4 – L = 5.9mm hr = 2.9mm	5 – L = 7.1mm hr = 3.5mm	6 – L = 9.2mm hr = 2.1mm
		
7* – L = 5.8mm hr = 3.7mm	8 – L = 8.8mm hr = 3.0mm	9* – L = 10.2mm hr = 3.1mm
		
10 – L = 4.7mm hr = 2.3mm	11 – L = 5.3mm hr = 2.6mm	12* – L = 7.8mm hr = 4.0mm
		
13 – L = 5.0mm hr = 2.2mm	14 – L = 6.4mm hr = 2.5mm	15* – L = 9.8mm hr = 3.4mm
		
16* – L = 4.2mm hr = 2.4mm	17* – L = 6.4mm hr = 2.6mm	18* – L = 7.7mm hr = 4.6mm
		
19 – L = 3.9mm hr = 1.7mm	20 – L = 4.5mm hr = 1.9mm	21* – L = 6.4mm hr = 3.0mm
		
22* – L = 3.9mm hr = 2.5mm	23* – L = 5.7mm hr = 2.1mm	24* – L = 9.2mm hr = 2.0mm
		
25* – L = 4.7mm hr = 2.3mm	26* – L = 6.9mm hr = 2.0mm	27* – L = 8.8mm hr = 1.8mm

Figura 5.19 – Aspectos visuais dos cordões realizados com corrente pulsada e sobrecabeça.

Os ensaios realizados na posição sobrecabeça com corrente pulsada mostraram que a tendência ao escorrimento do cordão ocorre, geralmente, com tempo de pulso próximo a 1 segundo. Este problema é agravado ainda mais quando se usa uma corrente de pulso de valor elevado. A comprovação desta afirmativa pode ser observada pelos resultados obtidos durante os ensaios 9, 12, 15, 18 e 21, que constam da Figura 5.19.

A utilização da máxima corrente de pulso (320 A), ou valores superiores, permite aumentar a taxa de deposição do metal de adição, conforme os resultados apresentados pelas Figuras 5.21, 5.22 e 5.23. Todavia, não se pode deixar de considerar também que, na posição sobrecabeça o elevado valor desta corrente aumenta a probabilidade de ocorrência do escorrimento do cordão. Isto novamente pode ser comprovado pela análise dos resultados experimentais mostrados nas Figuras 5.21, 5.22 e 5.23. Nestes gráficos verifica-se que, de todos os ensaios realizados com corrente de pulso de 320 A (ensaios 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24 e 27), apenas os ensaios 3 e 6 foram aceitos por satisfazerem os critérios citados anteriormente. De fato, os ensaios 9,12,15,18,21,24 e 27 não foram rejeitados por apresentarem excessiva convexidade (que seria um dos resultados do escorrimento do cordão), mas porque os cordões são descontínuos ou irregulares no reforço e na largura. A Figura 5.20 mostra, em escala natural, a seção transversal do cordão realizado durante o ensaio 6.

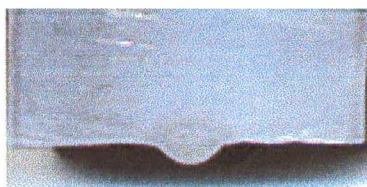


Figura 5.20 - Seção transversal do cordão em escala natural, realizado durante o ensaio 6.

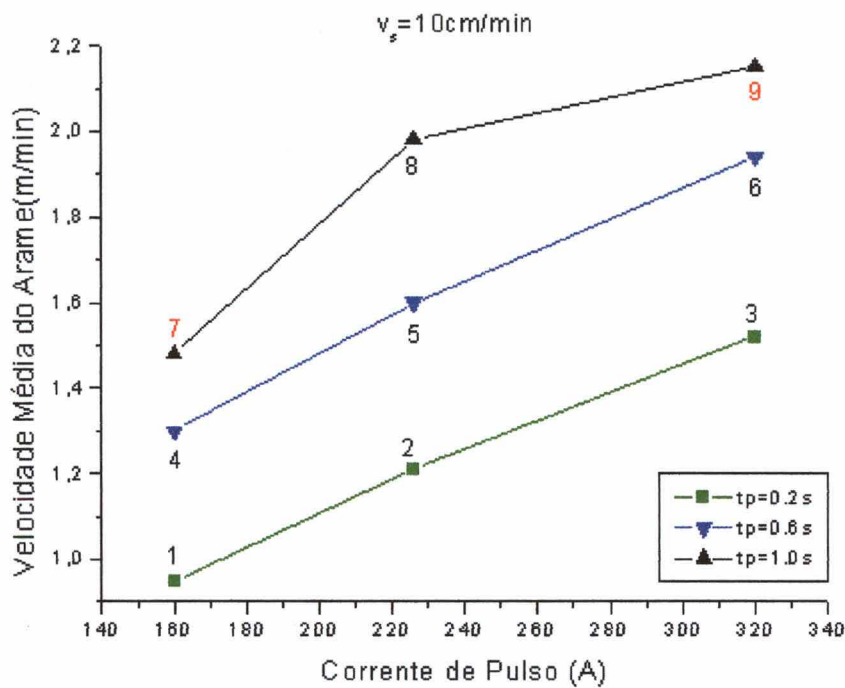


Figura 5.21 – Gráfico  $v_a = f(I_p; t_p)$ ;  $v_s = 10 \text{ cm/min}$ .

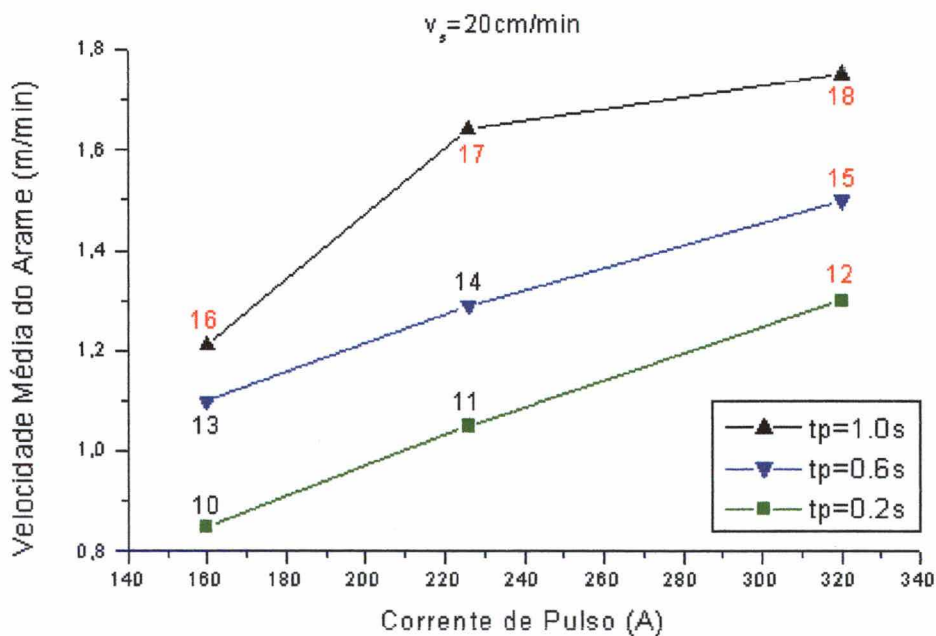


Figura 5.22 – Gráfico  $v_a = f(I_p; t_p)$ ;  $v_s = 20 \text{ cm/min}$ .

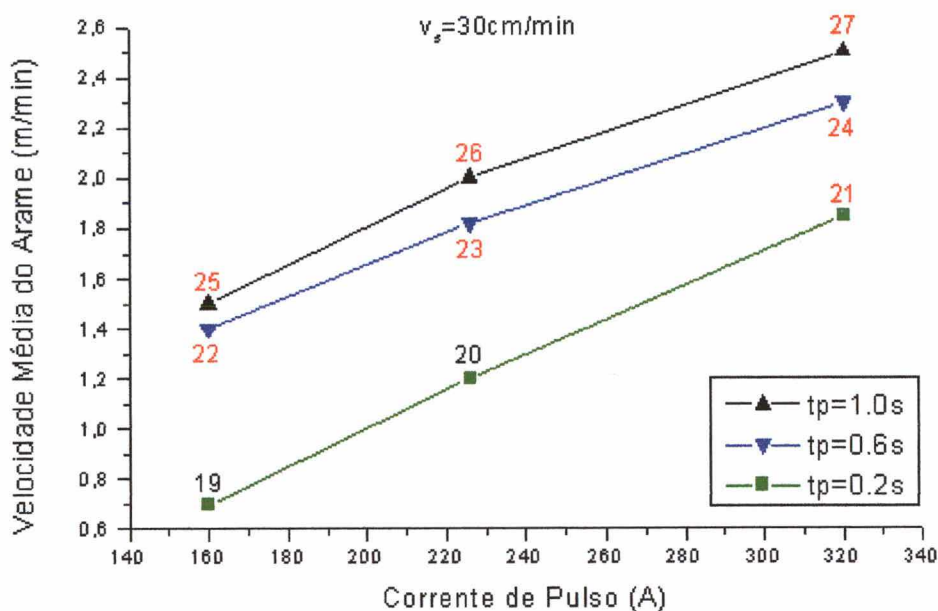


Figura 5.23 – Gráfico  $v_a = f(I_p; t_p)$ ;  $v_s = 30$  cm/min.

Os resultados da análise de variância (ANOVA) para  $v_s$ ,  $t_p$  e  $I_p$ , apresentados na Tabela 5.2, mostraram que estes três parâmetros foram significativos, para um nível de significância de 5 %.

Através de regressão múltipla dos resultados (daqueles que deram cordões aceitáveis) obtidos pela análise de Yates, com a adoção de um modelo linear de regressão, tem-se a seguinte expressão para o valor ideal da velocidade de alimentação do arame, como função dos principais parâmetros de controle:

$$v_a = a + b.v_s + c.t_p + d.I_p \pm \delta e \tag{5.1}$$

Onde :

$$a = 0,15 \text{ m/min}; b = -0,023 \text{ m/cm}; c = 1,2 \text{ m/min.s}; d = 0,0045 \text{ m/min.A.}$$

$$\delta e = 0,3 \text{ m/min}; v_a \text{ [m/min]}; v_s \text{ [cm/min]}; t_p \text{ [s]}; I_p \text{ [A].}$$

Coefficiente de correlação “R” igual a 0,91.



Esta expressão matemática pode ser usada com as variáveis dentro das seguintes faixas de utilização: velocidade de soldagem entre 10 e 30 cm/min, tempo de pulso entre 0,2 e 1,0 s e corrente de pulso entre 160 e 320 A, auxiliando bastante na resolução de vários problemas relacionados com a determinação das condições ótimas de soldagem, na posição sobrecabeça.

Fonte	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	MS	F calculado	F tabelado	Significância
$v_s$	2	0.8981	0.4490	26.43	4.46	Signif.
$t_p$	2	2.0757	1.0379	61.08	4.46	Signif.
$I_p$	2	0.6139	0.3069	18.07	4.46	Signif.
$v_s \times t_p$	4	0.0778	0.0194	1.14	3.84	Não Signif.
$v_s \times I_p$	4	0.1381	0.0345	2.03	3.84	Não Signif.
$t_p \times I_p$	4	0.2588	0.0647	3.81	3.84	Não Signif.
Resíduo	8	0.1359	0.0170			
Total	26	4.1982				

Tabela 5.2 - Resultados da análise de variância (ANOVA) para  $v_s$ ,  $t_p$  e  $I_p$  ( $\alpha = 5\%$ ).

#### 5.4.1 Validação do modelo

Para verificar a aplicabilidade do modelo proposto, em toda a sua faixa de utilização, é preciso validá-lo nestas condições. Para tanto, foram escolhidas oito condições intermediárias, conforme mostrado na Tabela 5.3.

$v_s$ (cm/min)	$t_p$ (s)	$I_p$ (A)	$v_a$ (média) (m/min)	$v_b$ (base) (m/min)	$v_p$ (pulso) (m/min)	cordão
15	0,4	190	1,14	0,50	1,78	A
15	0,4	270	1,50	0,50	2,50	B
15	0,8	190	1,62	0,50	2,74	C
15	0,8	270	1,98	0,50	3,46	D
25	0,4	190	0,91	0,50	1,32	E
25	0,4	270	1,27	0,50	2,04	F
25	0,8	190	1,39	0,50	2,28	G
25	0,8	270	1,75	0,50	3,00	H

Tabela 5.3 - Condições intermediárias para validação do modelo matemático proposto.

O aspecto visual dos cordões produzidos a partir dos valores propostos pelo modelo matemático ratifica a validação deste modelo. Isto pode ser constatado pela observação dos cordões apresentados na Figura 5.24. Estes cordões foram realizados utilizando-se o valor médio de velocidade de arame obtido através da expressão matemática proposta (equação 5.1). Durante a realização dos ensaios de validação do modelo, utilizou-se o valor fixo de 0,50 m/min para a velocidade base do arame, por se tratar de um valor adequado para a alimentação do arame durante o tempo de aplicação da corrente de base ( 40 A ).


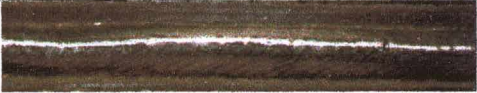
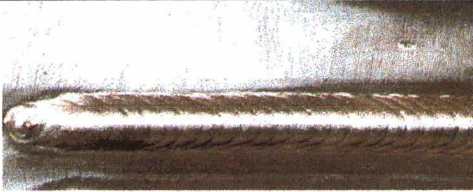





	
<b>Cordão “A” ( L = 6.9mm; hr = 3.3mm )</b>	<b>Cordão “B” ( L = 7.2mm; hr = 3.5mm )</b>
	
<b>Cordão “C” ( L = 6.5mm; hr = 3.1mm )</b>	<b>Cordão “D” ( L = 8.0mm; hr = 3.9mm )</b>
	
<b>Cordão “E” ( L = 6.1mm; hr = 2.9mm )</b>	<b>Cordão “F” ( L = 7.1mm; hr = 3.5mm )</b>
	
<b>Cordão “G” ( L = 7.6mm; hr = 3.3mm )</b>	<b>Cordão “H” ( L = 7.8mm; hr = 3.7mm )</b>

Figura 5.24 - Aspecto visual dos cordões, realizados com a utilização do modelo matemático proposto.

### 5.5 O reprojeto da tocha

A tocha TIG para alimentação automática de arame necessita de um dispositivo ajustável, responsável pelo direcionamento do mesmo até a poça de fusão. Este posicionamento do arame é uma variável fundamental do processo.

O arame segue paralelo às mangueiras de refrigeração da tocha e aos cabos de alimentação de energia, através de um tubo flexível, denominado por “conduíte”, até as proximidades da tocha. O arame precisa ser direcionado de forma atingir a poça de fusão exatamente no instante em que será fundido. Para tanto, foi necessário o projeto e desenvolvimento de um suporte

direcionador do arame adaptado na tocha. Este suporte possui três graus de liberdade de movimento, que permitem o correto posicionamento do arame.

Este suporte foi exaustivamente testado durante os ensaios realizados, porém apresentou alguns problemas, como falta de rigidez e excesso de atrito interno entre o conduto de “nylon” (de diâmetro interno 2 mm) e o arame, exigindo, assim, um maior torque nos roletes de tracionamento. Estes fatos motivaram um reprojeto da tocha, cuja concepção final está mostrada nas Figuras 5.25 e 5.26.

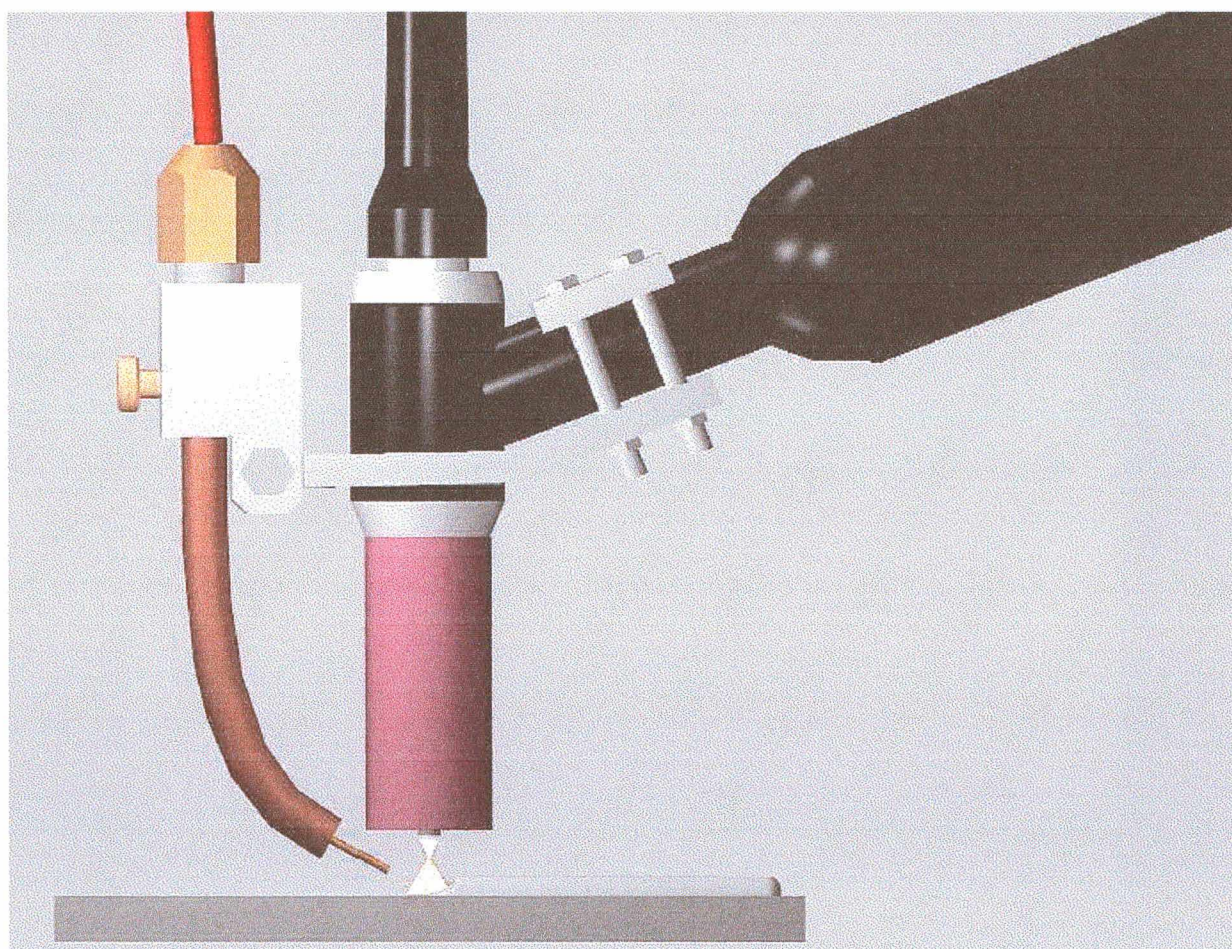


Figura 5.25 - Concepção final do reprojeto da tocha TIG para alimentação automática de arame (vista lateral).

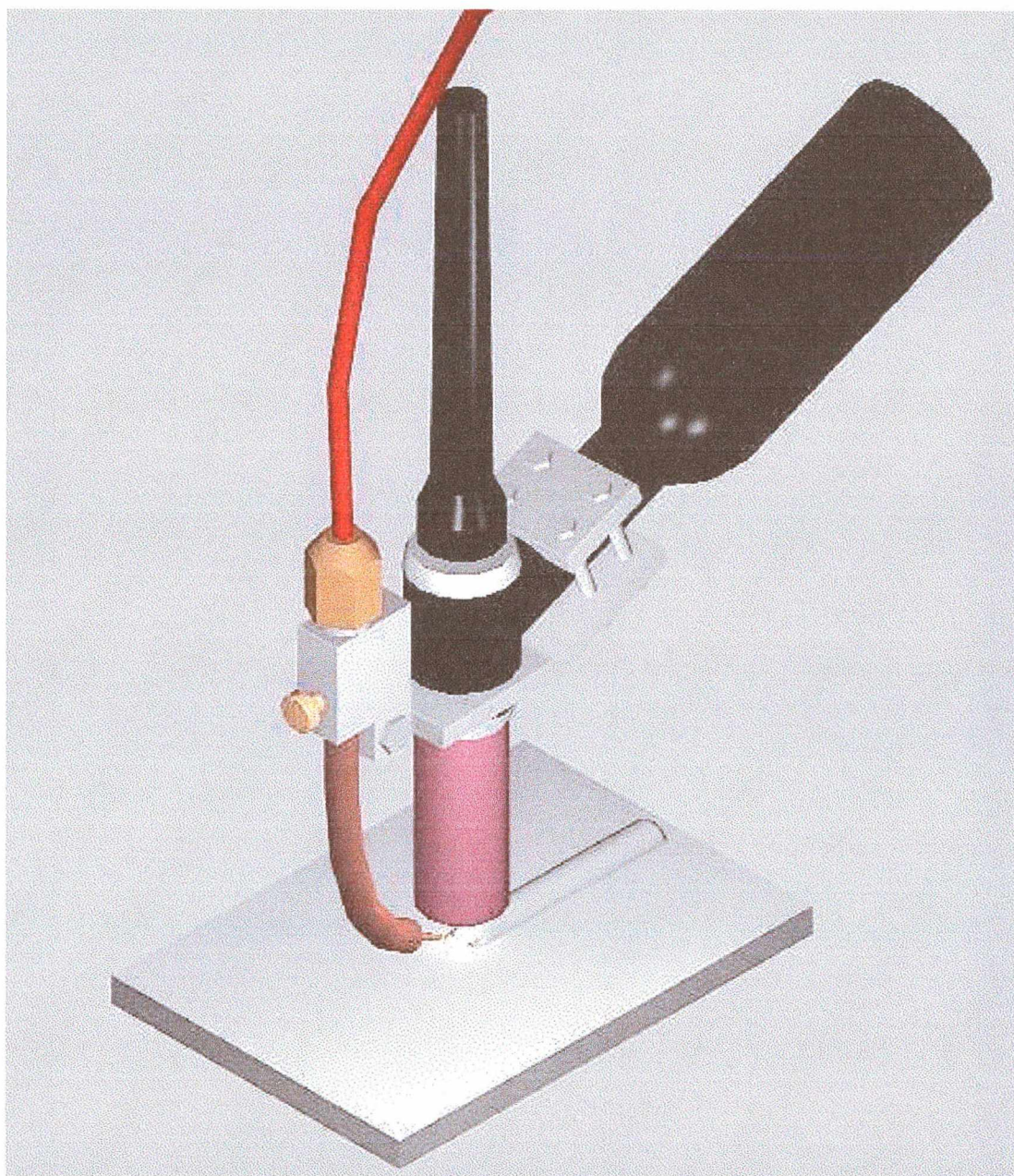


Figura 5.26 - Concepção final do reprojeto da tocha TIG para alimentação automática de arame  
(vista em perspectiva).

## CAPÍTULO VI

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 O processo TIG com alimentação automática de arame

- O correto posicionamento do arame afeta diretamente a estabilidade do arco. Observou-se que o arame deve ser direcionado exatamente para a base inferior do mesmo, onde se encontra a poça de fusão, principalmente na posição sobrecabeça onde, neste caso, a ação da gravidade tende a fazer a gota cair sobre o eletrodo, quando o arame está afastado da poça metálica. Nestas condições, o arame entra em contato com a poça ainda sólido, porém, se funde rapidamente, garantindo uma continuidade da fusão. Quando se afasta verticalmente da poça de fusão, em direção ao eletrodo, percebe-se a formação de gotas em fusão, que não se transferem regularmente para a poça;
- A posição relativa arco-aramé afeta significativamente a qualidade dos depósitos realizados. A alimentação de arame realizada pela frente do arco resulta em melhor aspecto visual do cordão;
- A análise do oscilograma de tensão permite o reconhecimento do comportamento estável ou instável do arco, possibilitando um controle simples e inteligente do processo TIG alimentado. Neste processo, a presença do arame no arco reflete numa variação de tensão. As características de resposta dos oscilogramas da tensão mostram que o aspecto destes é um fator indicativo das condições de alimentação do arame (Figuras 5.4, 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8). Instabilidades na taxa de fusão do arame provocam mudanças na tensão

do arco. Utilizando esta característica, a tensão pode ser vista como um elemento sensor da condição de alimentação do arame, e possivelmente atuar como um sinal de realimentação em um sistema automatizado;

- Para cada valor de potência, desenvolvida no arco voltaico, existe uma condição ideal de estabilidade do arco, que permite sua fusão continuamente. Quando esta condição não é obtida, ocorrem defeitos como falta de fusão do arame (colisões do arame ainda sólido com a peça) e descontinuidades ao longo da extensão do cordão (fusão excessiva do arame);
- No processo TIG pulsado com alimentação automática de arame, na posição sobrecabeça, existe uma significativa influência dos parâmetros de soldagem (velocidade de soldagem e velocidade de alimentação de arame) e parâmetros de pulso (corrente de pulso e frequência) sobre a geometria do cordão depositado. Estes efeitos precisam sempre ser investigados para que se possa avançar no estudo deste processo com alta taxa de deposição sem comprometimento da qualidade da geometria do depósito. Portanto, é possível se obter cordões de solda com geometria otimizada, mediante a correta combinação dos parâmetros controláveis do pulso;
- Todos os ensaios realizados mostraram que, para  $(h_r / L) < 0,5$  tem-se cordões com geometria aceitável, do ponto de vista de convexidade;
- Os resultados obtidos sugeriram a criação de um modelo matemático capaz de inter-relacionar as variáveis de mérito envolvidas no processo, em função das condições de soldagem preestabelecidas. Portanto, tem-se uma ferramenta básica e fundamental para ser usada no Controle Sinérgico do Processo;
- Normalmente, a corrente e o tempo de pulso são indicados como sendo os parâmetros críticos no controle da qualidade do cordão depositado na posição sobrecabeça [5, 15,

- 16]. Entretanto, outros parâmetros, como a velocidade de soldagem, exercem uma influência significativa na qualidade do cordão de solda formado;
- O aumento da energia desenvolvida no arco voltaico, resulta numa tendência ao escorrimento da solda na posição sobrecabeça. A corrente média, o comprimento do arco e a velocidade de soldagem são os maiores responsáveis por este problema. Estas duas variáveis, juntamente com a velocidade de alimentação do arame, têm que ser ajustadas dentro dos limites impostos pela energia dissipada no arco (J/m), a fim de evitar o escorrimento do cordão. Esta energia precisa ser mantida dentro de limites estabelecidos por um mínimo necessário para garantir a formação da poça fundida (nesta situação torna-se difícil a alimentação de arame, pois não resta energia suficiente para fundi-lo. Além disso, tem-se uma baixa molhabilidade do cordão, tornando-o bastante convexo) e um máximo insuficiente para causar o escorrimento do cordão. Portanto, velocidades de soldagem mais baixas (10 cm/min) tendem a dificultar a manutenção da poça de fusão, podendo causar escorrimento da mesma. Esta condição faz limitar o valor máximo da corrente de soldagem e o cordão torna-se bastante convexo;
  - Na posição plana de soldagem, o máximo valor da velocidade do arame está limitado ao máximo valor conseguido pelo cabeçote “ STA – TIG ” ( 7,3 m/min ). Na posição sobrecabeça com corrente contínua constante ( CCC ) o limite da velocidade do arame (2,0 m/min) está condicionado ao início do escorrimento do cordão. O uso da corrente pulsada não eleva, significativamente, o limite de velocidade média do arame. Entretanto, consegue-se melhorar a geometria do cordão obtido, através da escolha correta dos parâmetros de soldagem.



## 6.2 Recomendações para trabalhos futuros

Durante a realização dos ensaios verificou-se que o movimento linear da tocha na direção de soldagem freqüentemente resultou em cordões estreitos. Esta pequena largura dos cordões dificultou a obtenção da planicidade do depósito, na posição sobrecabeça. Portanto, na tentativa de aumentar a largura dos cordões depositados recomenda-se o estudo do processo aplicando-se também um pequeno movimento de oscilação lateral na tocha, denominado tecimento.

Recomenda-se também o estudo do processo TIG com alimentação automática de arame pré-aquecido (Arame Quente), visando obter maiores taxas de deposição do arame.

A execução simultânea da filmagem em alta velocidade, durante a soldagem, pode ajudar na observação e análise do processo, resolvendo questões não tão bem esclarecidas neste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] – STREET J. A., “Pulsed Arc Welding”, 1ª edição, Cambridge – England, Abington Publishing, 1990, p. 6-19.
- [2] – LUCAS W., “TIG and Plasma Welding”, 1ª edição, Cambridge – England, Abington Publishing, 1990, p. 3-25.
- [3] – GERKEN J. M., “Gas Tungsten Arc Welding”, The Lincoln Electric Company, 1995, p.1-21.
- [4] – KEY J. F., “Anode/Cathode Geometry and Shielding Gas Interrelationships in GTAW”, U.S.A., Welding Journal, Dez. 1980, p. 364-370.
- [5] – GONZALEZ A. R., CASSINA J. C., MACHADO I. G., “Técnicas Fatoriais na Avaliação da Influência dos Parâmetros de Pulso sobre a Geometria do Cordão em Soldagem por Processo TIG com Corrente Pulsada”, Anais do XXI ENTS, Caxias do Sul – R.S., jun. 1995, p. 851-866.
- [6] – RICHARDSON M., “Semiautomatic Cold Wire Feeder Systems Increase GTA Productivity”, Welding Journal, Jan. 1995, p. 51-54.
- [7] – SYKES I. and DIGIACOMO J., “Automatic Hot Wire GTA Welding of Pipe Offers Speed and Increased Deposition”, Welding Journal, Jul. 1995, p. 53-56.

- [8] – RAMIREZ A., “Análise e Desenvolvimento do Processo MIG/MAG Duplo Arame com Potencial Único”, Dissertação de Mestrado, UFSC, 1999 , p. 69–72.
- [9] – VERGARA V., “Análise dos Parâmetros e Variáveis da Soldagem Plasma “keyhole” para Determinação de Seus Graus de Relevância”, Anais do XXV ENTS, Belo Horizonte, set. 1999, p. 2–4.
- [10] – SUN Z., KUO M. and PAN D., “Twin-Wire Gas Tungsten Arc Cladding Offers Increased Deposition Rates”, Welding Journal, Out. 1999, p. 61-64.
- [11] – LAMBERT J. A. And GILSTON P. F., “Hot-Wire GTAW for Nuclear Repairs”, Welding Journal, Set. 1990, p. 45-52.
- [12] – TUSEK J., “Wirkungsgrad des Lichtbogenschweißens”, Schweissen & Schneiden, 51 (1999) Heft 7, p. 406-411.
- [13] – BECKER D. W. and ADAMS JR. C. M., “Investigation of Pulsed GTA Welding Parameters”, Welding Journal, Mai. 1978, p. 134-138.
- [14] – GUIMARÃES A. S. e ALMEIDA NETO J.C. P., “Estudo da Potência Elétrica Dissipada em Processo TIG Pulsado Através da Análise Estatística de Parâmetros de Pulso”, Soldagem & Inspeção, ano 5 – nº 6, jun. 1999, p. 1-7.

[15] – JORGE J. C. F., MOSCIARO H. B., COSTA J. F. M., JUNIOR V. P. C., “Estudo da Avaliação dos Parâmetros de Soldagem do Processo TIG Pulsado nas Características do Cordão de Solda”, Anais do XIII ENTS, Guarujá – SP, out. 1987, p. 45-55.

[16] – GUIMARÃES A. S. e ALMEIDA NETO J.C. P., “Efeito dos Parâmetros de Pulso sobre a Geometria do Cordão de Solda em Soldagem de Chapa Fina de Aço Inox AISI 304, pelo Processo TIG Pulsado”, Soldagem & Inspeção, ano 4 – nº 6, jun. 1998, p. 9-16.

[17] – SAVAGE W. F., STRUNCK S. S., ISHIKAWA Y., “The Effect of Electrode Geometry in Gas Tungsten Arc Welding”, U.S.A., Welding Journal, Nov. 1965, p. 1-8.

[18] – INSTITUTO DE MECATRÔNICA, “MTE DIGITEC 300”, Manual de Instruções, 1ª Edição, 1998.

[19] – QUITES, A. M.; DUTRA, J. C., “Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico”, Livro, EDEME, 1979.