

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

**DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO E DE METODOLOGIA DE
PARAMETRIZAÇÃO PARA A SOLDAGEM ORBITAL TIG**

**Dissertação submetida à
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
para obtenção do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

TIAGO VIEIRA DA CUNHA

Florianópolis, Outubro de 2008

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

**DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO E DE METODOLOGIA DE
PARAMETRIZAÇÃO PARA A SOLDAGEM ORBITAL TIG**

TIAGO VIEIRA DA CUNHA

Esta dissertação foi julgada e adequada para obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA

Sendo aprovada em sua forma final

Prof. Jair Carlos Dutra, Dr.Eng.
Orientador

Prof. Eduardo Alberto Fancello, D.Sc.
Coordenador do curso

BANCA EXAMINADORA

Carlos Eduardo Iconomos Baixo, Dr. Eng.

Prof. Américo Scotti, Ph.D.

Prof. Nelso Bonacorso, Dr. Eng.

Prof. Nelson Back, Ph.D.

A todos que me querem bem,
Abelardo, Neide, Fabienne e Edoarda.

AGRADECIMENTOS

Expresso os meus sinceros agradecimentos a todos que colaboraram de alguma forma para a realização desse trabalho:

Aos grandes mestres que tive, Eng. Raul Gohr Júnior, pela amizade e exemplo de dedicação, Eng. Larry Fiori Ollé (*in memorium*), pela paciência incondicional e conhecimentos transmitidos e ao prof. Jair Carlos Dutra, pela orientação e pela oportunidade de participar de um grupo de pesquisa tão competente.

Ao Eng. Carlos Eduardo Iconomos Baixo pela imensa colaboração na escrita do trabalho.

Aos Eng. Guilherme Locatelli, Régis H. G. e Silva, Norton Z. Kejelin, Tecnólogo Renon S. Carvalho e Designer Marcelo P. Okuyama pela colaboração em diversos aspectos do trabalho.

A toda equipe do LABSOLDA, em especial à Ricardo Campagnin, Hebert G. Militao, Jader G. da Silveira, Márcia Paula Thiel, Cleber H. da Cunha.

A “galera das antigas” Erwin, Adriano Maurici, Rodrigo (Palhacinho), Denise, Cátia, Marcelo Corrêa, Marcelo Almeida, Marcelo Mota, Valério, Jean, Moisés, Victor Vergara, André Leal, Wanderlei e Daniel Amorin, pelo companheirismo e apoio no início de minhas atividades no laboratório.

Ao povo brasileiro, que apesar da adversidade e da dificuldade constrói este país e ainda colabora com o desenvolvimento científico e tecnológico.

Ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pela minha aceitação como aluno de tão renomada instituição.

Aos amigos da equipe Andarilha pelo companheirismo e os bons momentos que passamos juntos.

Aos professores Clóvis Raimundo Maliska e Axel Dihlmann e também a ANP (Agencia Nacional de Petróleo), pelo financiamento de parte do trabalho por meio da bolsa de pesquisa e compra de materiais.

SUMÁRIO

<u>1</u>	<u>INTRODUÇÃO</u>	16
1.1	OBJETIVOS	17
1.2	JUSTIFICATIVAS	18
<u>2</u>	<u>SOLDAGEM TIG ORBITAL</u>	19
2.1	PROCESSO DE SOLDAGEM TIG	19
2.1.1	HISTÓRICO	19
2.1.2	CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO	19
2.1.3	TIPOS DE GASES UTILIZADOS	23
2.1.4	ELETRODO	24
2.1.5	ABERTURA DO ARCO	25
2.1.6	CORRENTE PULSADA	27
2.2	SISTEMAS DE SOLDAGEM ORBITAL TIG	29
2.2.1	HISTÓRICO	29
2.2.2	ESTRUTURA DE UM SISTEMA DE SOLDAGEM ORBITAL	29
<u>3</u>	<u>HISTÓRICO DO DESENVOLVIMENTO DA SOLDAGEM TIG ORBITAL NO LABSOLDA</u>	32
3.1	INTRODUÇÃO	32
3.2	PRIMEIRA FASE: PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM PRIMEIRO PROTÓTIPO DO CABEÇOTE ORBITAL	32
3.3	SEGUNDA FASE: CONSTRUÇÃO DE UM SEGUNDO PROTÓTIPO DO CABEÇOTE ORBITAL	36
3.4	TERCEIRA FASE: DESENVOLVIMENTO DA UNIDADE DE CONTROLE	38
3.5	QUARTA FASE: CONTINUAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DA UNIDADE DE CONTROLE	42
<u>4</u>	<u>DESENVOLVIMENTO DA ARQUITETURA FINAL DO SISTEMA DE SOLDAGEM ORBITAL</u>	47
4.1	INTRODUÇÃO	47
4.2	UNIDADE DE CONTROLE	48
4.3	CABEÇOTE ORBITAL	52

4.4	FONTE DE SOLDAGEM	54
4.5	IHM DE COMANDO REMOTO	56
4.6	CONTROLE DA VELOCIDADE DE DESLOCAMENTO DO ELETRODO	56
4.7	FUNÇÕES DE CONTROLE	59
4.7.1	FUNÇÃO P_HOME	60
4.7.2	FUNÇÃO P_ELT	61
4.7.3	MENU CARREGAR	62
4.7.4	MENU CONFIGURAR	63
4.7.5	MENU PROCESSO	65
4.7.6	FUNÇÃO DESLIGAR	69
4.8	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO SISTEMA DE SOLDAGEM ORBITAL	69
4.8.1	CORRENTE DE SOLDAGEM	69
4.8.2	VELOCIDADE DE DESLOCAMENTO	71
4.8.3	SOLDAGEM COM CORRENTE CONSTANTE	72

5 METODOLOGIA PARA A DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM ORBITAL DE TUBOS PELO PROCESSO TIG PULSADO **75**

5.1	DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA A DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS NA SOLDAGEM TIG PULSADA	75
5.1.1	DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE SOLDAGEM	76
5.1.2	DETERMINAÇÃO DA CORRENTE DE PULSO	79
5.2	BANCADA DE DESENVOLVIMENTO DE TESTES DE SOLDAGEM	80
5.2.1	TARTÍLOPE V1	82
5.2.2	MINITEC 200	83
5.2.3	MESA DE SOLDAGEM	84
5.2.4	MICROCOMPUTADOR EQUIPADO COM INTERDATA	85
5.2.5	SOFTWARE DE CONTROLE DA BANCADA DE DESENVOLVIMENTO DE TESTES DE SOLDAGEM	86
5.2.6	MODOS DE OPERAÇÃO DO SOFTWARE	88

6 RESULTADOS E ANÁLISE **91**

6.1	SOLDAS DE UNIÃO DE TUBOS	91
6.1.1	SOLDAGEM COM CORRENTE PULSADA APLICANDO A METODOLOGIA DESENVOLVIDA	91
6.1.2	SOLDAGEM COM CORRENTE PULSADA BUSCANDO MAIOR VELOCIDADE DE SOLDAGEM	95

<u>7</u>	<u>CONCLUSÕES</u>	<u>104</u>
<u>8</u>	<u>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</u>	<u>106</u>
<u>9</u>	<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	<u>107</u>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Soldagem manual de um tubo estático	16
Figura 2.1 – Esquema do processo de soldagem TIG	20
Figura 2.2 – Característica estática do arco elétrico do processo TIG	21
Figura 2.3 – Esquema de distribuição de tensão ao longo de um arco TIG.....	22
Figura 2.4 – Macrografias de soldas com diferentes percentuais de hidrogênio misturado ao gás de proteção.....	24
Figura 2.5 – Centelhas produzidas por um circuito de alta frequência.....	26
Figura 2.6 – Forma de onda da corrente no processo TIG pulsado	27
Figura 2.7 – Efeito da forma de onda pulsada sobre o cordão de solda	28
Figura 2.8 – Cabeçote orbital de câmara fechada (18)	31
Figura 2.9 – Cabeçote orbital de câmara aberta (19).....	31
Figura 3.1 – Concepção baseada no princípio de cartucho	33
Figura 3.2 – Modelo cinemático gerado em ambiente CAD	34
Figura 3.3 – Cinemática do sistema rotativo. Em (a) e (c) carregamento crítico e em (b) carregamento normal.....	35
Figura 3.4 – Primeiro protótipo do cabeçote orbital.....	35
Figura 3.5 – Contato elétrico entre o mancal e a engrenagem principal	36
Figura 3.6 – Terminal-mancal mola desenvolvido	37
Figura 3.7 – Segundo protótipo do cabeçote orbital.....	38
Figura 3.8 – Bancada de desenvolvimento da unidade de controle (23).....	39
Figura 3.9 – Estrutura adotada no desenvolvimento do sistema de soldagem TIG orbital (23).....	40
Figura 3.10 – Protótipo da placa de interface e controle (23).....	41
Figura 3.11 – Bancada de desenvolvimento montada no CEFET-SC.....	42
Figura 3.12 – Servo driver R2010 fabricado pela empresa rutex	43
Figura 3.13 – Tela do programa de configuração do servo driver	44
Figura 3.14 – Circuito de fontes auxiliares e geração de sinal	45
Figura 4.1 – Estrutura adotada no desenvolvimento do cabeçote orbital.....	48
Figura 4.2 – Detalhamento da unidade de controle.....	49
Figura 4.3 – Circuito de isolamento de sinais. Em (a) Isolamento dos sinais do cabeçote, em (b) Isolamento dos sinais da fonte de soldagem e em (c) isolamento dos sinais do teclado de comando.....	50

Figura 4.4 – Protótipo da unidade de controle	52
Figura 4.5 – Cabeçote orbital com o mangote instalado	53
Figura 4.6 – Rotina de interrupção que define a velocidade do motor	57
Figura 4.7 – Fluxograma do programa principal de controle do sistema de soldagem orbital	59
Figura 4.8 – Tela principal do programa.....	60
Figura 4.9 – Cabeçote orbital na posição de HOME e detalhe do sensor.....	61
Figura 4.10 – Cabeçote orbital posicionado para a troca do eletrodo. Detalhe do sistema de fixação do eletrodo.....	62
Figura 4.11 – Menu CARREGAR.....	63
Figura 4.12 – Menu CONFIGURAR	63
Figura 4.13 - Divisão do tubo em 4 seções e suas respectivas posições de soldagem	64
Figura 4.14 – Menu do processo de soldagem	65
Figura 4.15 - Fluxograma de controle do processo de soldagem.....	68
Figura 4.16 – Forma de onda da corrente adquirida.....	70
Figura 4.17 – Estrutura montada para aquisição da velocidade de deslocamento do cabeçote orbital.....	71
Figura 4.18 – Forma de onda da velocidade adquirida.....	72
Figura 4.19 – Solda de união de tubos com corrente contínua constante, em (a) face e em (b) raiz da solda. Parâmetros: I: 36 A e Vs: 2 mm/s (12 cm/min).	73
Figura 4.20 – Seção transversal da solda com corrente constante: (a) posição plana, (b) vertical descendente, (c) sobre-cabeça e (d) vertical ascendente.	74
Figura 5.1 – Ponto de solda elementar	77
Figura 5.2 – Cordão de solda com dois pontos	77
Figura 5.3 – Cordão de solda com três pontos.....	78
Figura 5.4 – Bancada de desenvolvimento. Em (1) Unidade de controle, em (2) Carro do Tartílope, em (3) Mesa de soldagem, em (4) Computador equipado com a Interdata e em (5) Fonte de soldagem Minitec 200.....	81
Figura 5.5 – Fluxo de informações da bancada de desenvolvimento.....	81
Figura 5.6 – Tartílope V1	83
Figura 5.7 – Aquisição de corrente na Minitec 200	84
Figura 5.8 – Mesa de soldagem.....	85
Figura 5.9 - Interdata.....	85

Figura 5.10 – Tela do programa de controle da bancada.....	87
Figura 5.11 – Seleção da região de parâmetros de forma de onda da corrente	87
Figura 5.12 – Região de configuração do Tartilope	88
Figura 5.13 – Procedimento de realização do ponto (Modo Script).....	89
Figura 5.14 – Forma de onda da corrente no modo de operação Estágios	90
Figura 6.1 – Ponto de solda, em (a) face e em (b) raiz. Parâmetros: I: 130 A e t: 0,4 s.	91
Figura 6.2 – Ensaio para a determinação da corrente de pulso (ajuste grosso). (a) Face e (b) raiz da solda.....	92
Figura 6.3 - Ensaio para a determinação da corrente de pulso (ajuste fino). (a) Face e (b) raiz da solda	93
Figura 6.4 – Solda de união de tubos realizada com corrente pulsada. Detalhe entre 6 e 9 horas, (a) face e (b) raiz da solda. Parâmetros: I _p : 40 A, t _p : 0,4 s, I _b : 10 A, t _b : 0,4 s, V _{sp} : 0 mm/s 0 (cm/min), V _{sb} : 2,5 mm/s (15 cm/min) e V _{ms} : 1,25 mm/s (7,5 cm/min)	94
Figura 6.5 - Seção transversal da solda com corrente pulsada: (a) posição plana, (b) vertical descendente, (c) sobre cabeça e (d) vertical ascendente.....	95
Figura 6.6 - Ponto de solda, (a) face e (b) raiz. Parâmetros: I: 250 A e t: 0,2 s.....	96
Figura 6.7 - Ensaio para a determinação da corrente de pulso (ajuste fino). (a) Face e (b) raiz da solda	97
Figura 6.8 - Ensaio para a determinação da corrente de pulso (ajuste fino). (a) Face e (b) raiz da solda	98
Figura 6.9 - Solda de união de tubos realizada com corrente pulsada. Detalhe entre 6 e 9 horas, (a) face e (b) raiz do cordão. Parâmetros: I _p : 60 A, t _p : 0,2 s, I _b : 10 A, t _b : 0,2 s, V _{sp} : 0 mm/s (0 cm/min), V _{sb} : 5 mm/s (30 cm/min) e V _{ms} : 2,5 mm/s (15 cm/min)	98
Figura 6.10 - Seção transversal da solda com corrente pulsada: (a) posição plana, (b) vertical descendente, (c) sobre cabeça e (d) vertical ascendente.	99
Figura 6.11 – Gráfico de I (ponto) x I (cordão) obtido experimentalmente	100
Figura 6.12 – Esquema de medição de temperatura a uma dada distância da linha de fusão de acordo com a equação de Rykalin e Adams	102
Figura 6.13 - Gráfico de I (ponto) x I (cordão) obtido teoricamente.....	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Potencial de ionização de alguns gases (8)	24
Tabela 4.1 – Características da Fonte de Soldagem Larry Flex.....	55
Tabela 6.1 – Parâmetros utilizados/obtidos da equação de Adams.....	103

SIMBOLOGIA

dv/dt : Variação da tensão no tempo

$$\Delta T_p = T_p - T_0$$

$$\Delta T_f = T_f - T_0$$

c = Calor específico do material

C: Comprimento do cordão

Ce: Cério

CLK: Sinal de velocidade de deslocamento do eletrodo

CPU: Unidade central de processamento

D: Diâmetro do tubo (mm)

DEP: Distância eletrodo-peça

DIR: Sinal de sentido de giro do motor

e = Base dos logaritmos naturais

ERRO: Sinal de erro de posicionamento do eletrodo

h = Espessura da chapa

HI = Aporte de calor a peça

I: Corrente de soldagem

I²C: Protocolo de comunicação serial

Ib: Corrente de base

IHM: Interface homem máquina

Ip: Corrente de pulso

IREF: Sinal de referência de corrente

Kd: Constante derivativa

Ki: Constante integral

Kp: Constante proporcional

L: Largura do ponto

La: Lantânio

LABSOLDA: Laboratório de soldagem da UFSC

LCD: Display de cristal líquido

LG: Sinal liga gás

LP: Sinal liga potência

MVA: Medidor de velocidade de arame

NC: Número de contagens

P.I.D: Proporcional, integral e derivativo

RS-232: Protocolo de comunicação serial

S: Sobreposição

SAP: Sistema de aquisição portátil

SP: Sobreposição ajustada (mm)

T: Período de pulsação da corrente

t: tempo

T_0 = Temperatura de pré-aquecimento da chapa

tb: Tempo de base

T_f = Temperatura de fusão do material

Th: Tório

T_p = Temperatura máxima num dado ponto da peça

tp: Tempo de pulso

UA: Sinal de tensão do arco

Ua: Tensão anódica

Uarco: Tensão de arco

Uc: Tensão catódica

Vms: Velocidade média de soldagem

VNC: Valor real do número de contagens

Vs: Velocidade de soldagem

Vsb: Velocidade de soldagem durante o tempo de base da corrente

Vsp: Velocidade de soldagem durante o tempo de pulso da corrente

X: Deslocamento linear do eletrodo

XP: Quantidade de pulsos

Y_p = Distância da linha de fusão

Zr: Zircônio

ρ = Densidade do material

RESUMO

Uma forma mais simples para promover a soldagem de tubos por fusão consiste em rotacionar os mesmos em torno de seu eixo na posição horizontal, enquanto que a pistola de soldagem, ou o eletrodo, permanecem estacionários. Esta configuração permite elevadas velocidades de soldagem, produzindo soldas de boa qualidade e produtividade, principalmente porque os efeitos da gravidade atuam de forma favorável ao processo. Entretanto, na grande maioria dos casos, os tubos não podem ser rotacionados, sendo necessário que o soldador desloque a pistola de soldagem em torno dos mesmos. Além disso, as posições dos tubos são as mais variadas espacialmente. Isto torna a operação complexa, o que, além de exigir habilidade do soldador, não pode ser realizada em uma única etapa, tampouco conduzida em um ambiente onde o espaço disponível é restrito. Para resolver esta questão são utilizados equipamentos denominados de sistemas de soldagem orbitais, que rotacionam a tocha de soldagem ou o eletrodo em torno dos tubos a serem soldados. Contudo, o Brasil ainda não detém a tecnologia de fabricação de equipamentos desta natureza e tampouco existem metodologias e banco de informações referentes à procedimentos de soldagem para estas aplicações. Assim, com o intuito de contribuir com o desenvolvimento científico e tecnológico do país, foi desenvolvido este trabalho que abrange as duas deficiências citadas. Com relação ao desenvolvimento do equipamento foi construída toda a unidade de controle, hardware e software para o consubstanciamento do sistema a partir de um cabeçote orbital de câmara fechada, fruto de trabalhos anteriores, e de uma fonte de soldagem desenvolvida no próprio LABSOLDA. A parte relativa aos procedimentos de soldagem conta com o desenvolvimento de uma metodologia para a determinação dos parâmetros na soldagem TIG pulsada. Esta metodologia é fundamentada em aspectos dimensionais do cordão de solda desejado e no equacionamento da velocidade de soldagem. Seu desenvolvimento se deu numa bancada especialmente elaborada para este trabalho. Por fim, empregando o equipamento e a metodologia desenvolvida, foram realizadas soldas de união de tubos de 76,2 mm de diâmetro e 1,2 mm de espessura de parede, no qual os resultados se mostraram satisfatórios.

Palavras chave: União de tubos, TIG pulsado, Soldagem orbital.

ABSTRACT

A simpler form to perform fusion welding of tubes consists in rotating the tube around its axis in the horizontal position, while the welding torch, or the electrode stays stationary. This configuration allows high welding speeds, producing welds of good quality and productivity, mainly because the effects of the gravity act in a favorable way over the process. However, in most cases, the tubes cannot be rotated, rising the necessity for the welder to move the welding torch around the pieces. Besides, the reached welding positions are systematically varied. This makes the operation complex, and, besides demanding welder's ability, it can not be accomplished in a single stage, neither be driven in an atmosphere where the available space is restricted. In order to solve this problem orbital welding systems they are used, which rotate the welding torch or the electrode around the tubes to be joined. However, Brazil does not yet hold the production technology of equipments of this nature, neither methodologies and information banks regarding welding procedures for these applications. Therefore, with the intention of contributing with the scientific and technological development of the country, this work was developed in order to overcome the two mentioned deficiencies. Regarding the development of the equipment the whole control unit (hardware and software) was developed, as well as the system integration, consisting of a closed orbital head, result of previous works, and a welding source. The development of welding procedures is guided by a methodology for the determination of parameters for pulsed TIG welding. This methodology is based on desired dimensional aspects of the weld and on the equation of the welding speed. Its development was carried out in a workbench especially assembled for this work. Finally, using the equipment and the developed methodology, union welds of tubes of 76,2 mm diameter and 1,2 mm wall thickness were accomplished, which presented satisfactory results

KeyWords: Orbital system, Pulsed TIG, Orbital welding.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Uma forma mais simples para promover a soldagem de tubos por fusão consiste em rotacionar o tubo em torno de um eixo na posição horizontal enquanto a pistola de soldagem, ou o eletrodo, permanece em uma posição fixa. Esta configuração permite elevadas velocidades de soldagem, obtendo soldas de boa qualidade, principalmente devido ao fato dos efeitos da gravidade atuarem de forma favorável ao processo. Entretanto, na grande maioria dos casos, os tubos não podem ser rotacionados, sendo necessário que o soldador desloque a pistola de soldagem em torno do tubo (Figura 1.1). Esta é uma operação complexa, o que, além de exigir habilidade do soldador, não pode ser realizada em uma única etapa, tampouco conduzida em um ambiente onde o espaço disponível é restrito.



Figura 1.1 - Soldagem manual de um tubo estático

Para resolver esta questão são utilizados equipamentos denominados de sistemas de soldagem orbitais, que rotacionam a tocha de soldagem ou o eletrodo em torno dos tubos. Estes sistemas são utilizados em diferentes segmentos industriais, como:

a) O aeroespacial, onde os sistemas de alta pressão de uma simples aeronave requerem mais de 1500 soldas de união.

B) A indústria alimentícia, pois todas as soldas de união devem ser consistentes com penetração total, para evitar a contaminação do fluído circulante por bactérias.

C) Em plantas petroquímicas, as tubulações podem ser severamente agredidas pelo alto índice de corrosão do produto circulante, sendo necessárias constantes paradas para reparos.

D) Nas linhas de processos farmacêuticos e nos sistemas de tubulações de água desses processos, são necessárias soldas de alta qualidade para garantir a não contaminação da água por bactérias ou outros contaminantes (1).

Nessas, entre outras aplicações, o objetivo comum é o de garantir a qualidade da união e, assim, obter o máximo de eficiência do processo produtivo.

1.1 Objetivos

Diante da problemática apresentada, foi iniciada no LABSOLDA em meados de 2001 uma linha de pesquisa relacionada a soldagem TIG orbital, tendo como marco inicial o desenvolvimento de um cabeçote orbital TIG. Desde então, esforços vêm sendo empreendidos com o intuito de concretizar o desenvolvimento de um sistema de soldagem orbital TIG, no qual o próprio cabeçote é parte integrante. Dentro deste contexto surge como objetivo geral deste trabalho. Promover o consubstanciamento de um sistema de soldagem orbital TIG.

O termo consubstanciamento torna-se apropriado, uma vez que o objetivo deste trabalho é tomar as ações necessárias para que o equipamento como um todo seja concretizado. Para atingir este objetivo geral foram definidos como objetivos específicos os seguintes itens:

- Definir a topologia a ser adotada no desenvolvimento do sistema de soldagem orbital TIG;
- Desenvolver a unidade de controle do sistema com base nos componentes selecionados anteriormente;
- Tornar o cabeçote orbital apto a operar de forma integrada com o sistema;
- Adequar a interface da fonte de soldagem, às necessidades do sistema;

- Implementar um programa para o controle integrado do processo de soldagem, do cabeçote orbital e funções diversas do equipamento;

E, por fim, como aplicação

- Propor uma metodologia para a determinação das variáveis de soldagem envolvidas na soldagem TIG com corrente pulsada (corrente de base, corrente de pulso, tempo de base, tempo de pulso e velocidade de soldagem);
- Estruturar uma bancada de ensaios com a finalidade de tornar mais rápido e dinâmico o desenvolvimento da metodologia proposta;

1.2 Justificativas

O presente trabalho segue a filosofia de pesquisa e desenvolvimento adotada no LABSOLDA, em que novas tecnologias devem surgir em conjunto com o ferramental para executá-las. Esta conduta contribui de maneira mais eficaz para o desenvolvimento nacional do que quando atrelada a ferramental já disponível no mercado. Isto é particularmente importante para o Brasil no que tange à tecnologia da soldagem porque não são produzidos aqui equipamentos com o último estado da arte. Além disso, desenvolver procedimentos em equipamentos já comerciais, muitas vezes limita a criatividade, não se podendo ir além do que o projeto do equipamento permite. Assim, o presente trabalho associa a tecnologia de desenvolvimento de procedimentos de soldagem com o desenvolvimento do equipamento capaz de executá-los, criando subsídios científicos e tecnológicos para novos desenvolvimentos, frente a novas necessidades, além de preencher uma lacuna existente no país que consiste na falta de equipamentos, procedimentos e mão de obra especializada na área.

CAPÍTULO 2

SOLDAGEM TIG ORBITAL

2.1 Processo de soldagem TIG

2.1.1 Histórico

O processo de soldagem TIG foi inventado em meados de 1930, sendo Hobart e Devers os primeiros pesquisadores a investigarem a utilização de um eletrodo constituído de tungstênio para estabelecer um arco elétrico entre o mesmo e um metal de base. Suas experiências foram realizadas dentro de uma câmara fechada preenchida com gás inerte. Os gases de proteção empregados foram o argônio e o hélio. Contudo, devido ao elevado custo do gás inerte, o processo não foi utilizado comercialmente na época (2)(3).

Com a segunda guerra mundial, o processo TIG passou a ganhar destaque devido à necessidade da indústria aeronáutica em soldar alumínio e magnésio. Dentro deste contexto, Russell Meredith e V.H. Pavlecka desenvolveram a primeira tocha prática capaz de promover a correta fixação de um eletrodo de tungstênio e, ao mesmo tempo, conduzir um gás inerte para proteger a poça de fusão, o eletrodo e o metal base adjacente à poça fundida. Embora, o processo tenha sido desenvolvido com o gás hélio, o argônio logo se transformou no gás de proteção mais usado, devido a sua característica de boa estabilidade do arco voltaico e menor custo (2)(3). Desde então, o processo TIG tem evoluído drasticamente, principalmente em decorrência aos avanços tecnológicos na área de eletrônica que tem propiciado um controle cada vez mais apurado da corrente de soldagem.

2.1.2 Características do processo

No processo de soldagem TIG, o arco é estabelecido entre um eletrodo não consumível, constituído basicamente de tungstênio, e a peça a ser soldada (Figura 2.1).

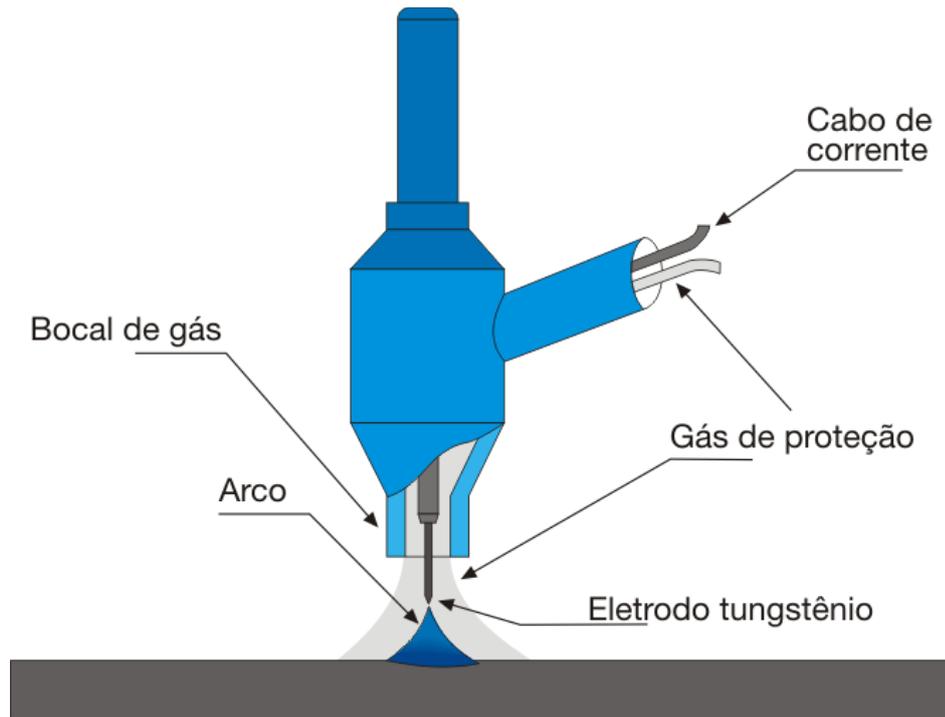


Figura 2.1 – Esquema do processo de soldagem TIG

O arco, tanto pode ser em corrente contínua ou corrente alternada. Usualmente, na corrente contínua, o eletrodo de tungstênio é conectado ao terminal negativo da fonte de soldagem, enquanto a peça a ser soldada ao terminal positivo, resultando num menor aporte de calor no eletrodo e maior estabilidade do arco. Nesta polaridade tem-se a emissão de elétrons a partir do eletrodo de tungstênio, no qual são acelerados enquanto viajam através do arco. Uma significativa quantidade de energia, chamada de função trabalho, é necessária para que o elétron possa ser emitido pelo metal, sendo que, quando o elétron colide com a peça de trabalho, essa energia, correspondente à função trabalho termiônica, é liberada, promovendo a fusão do metal de base. Contudo, esta polaridade apresenta a desvantagem de não propiciar a ação de limpeza na superfície do metal de base (4).

A configuração com polaridade positiva no eletrodo, conseqüentemente negativa na peça de trabalho, não é tradicionalmente utilizada em virtude do eletrodo de tungstênio apresentar-se fortemente agredido pelo calor do arco. Isto é resultante do fato de que, neste caso, o eletrodo de tungstênio permanece sujeito aos efeitos de aquecimento promovido pelo choque dos elétrons ao invés da peça de trabalho. Entretanto, nesta polaridade têm-se o efeito de limpeza da peça de trabalho (limpeza catódica). Este efeito de limpeza é explicado por maneiras distintas. Kou (4) atribui

ao efeito do bombardeamento dos íons devido à massa que os mesmos possuem. Porém, a explicação mais aceita faz referência à chamada emissão de cátodo frio. Nesta, a emissão de elétrons ocorre a partir de diminutos pontos de emissão, resultantes da formação de campos elétricos extremamente intensos na camada de óxidos. Tal mecanismo impõe elevadas densidades de corrente nestes pontos de emissão, removendo assim, a camada de óxido deste local e, conseqüentemente, promovendo a limpeza catódica (5).

Na polaridade negativa, o arco voltaico na soldagem TIG é extremamente estável, tendo grande versatilidade de aplicação produzindo soldas de excelente aparência e acabamento. A possibilidade de utilização de correntes baixas, conforme pode ser visualizado na Figura 2.2 que retrata algumas características estáticas do arco elétrico em levantamento realizado durante a realização deste trabalho, viabiliza a soldagem de chapas bastante finas (inferior a 1 mm) e peças pequenas.

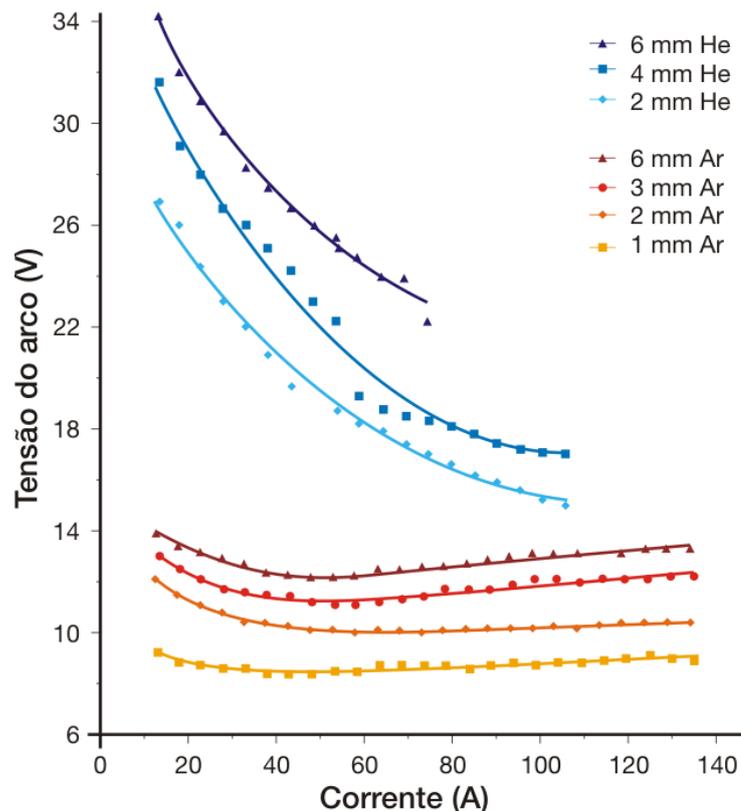


Figura 2.2 – Característica estática do arco elétrico do processo TIG

Estas relações tensão versus corrente para o arco TIG apresentam um comportamento peculiar: é encontrado um valor mínimo de tensão para uma determinada corrente. Para valores à direita desta corrente, o comportamento das curvas é semelhante a um resistor ôhmico. Já para menores valores de corrente, a literatura aponta que este comportamento é próprio do arco elétrico e reflete o fato de que, neste, a condução da corrente elétrica é feita por íons e elétrons gerados por ionização térmica. Sendo assim, quando a corrente é baixa, existe pouca energia disponível para o aquecimento e ionização do meio em que o arco ocorre, resultando em uma maior dificuldade para a passagem da corrente e, como consequência, em um aumento da tensão elétrica do arco (6).

A queda de tensão ao longo do arco não é uniforme. Ela pode ser dividida, de forma simplificada, em três regiões distintas, conforme mostra a Figura 2.3.

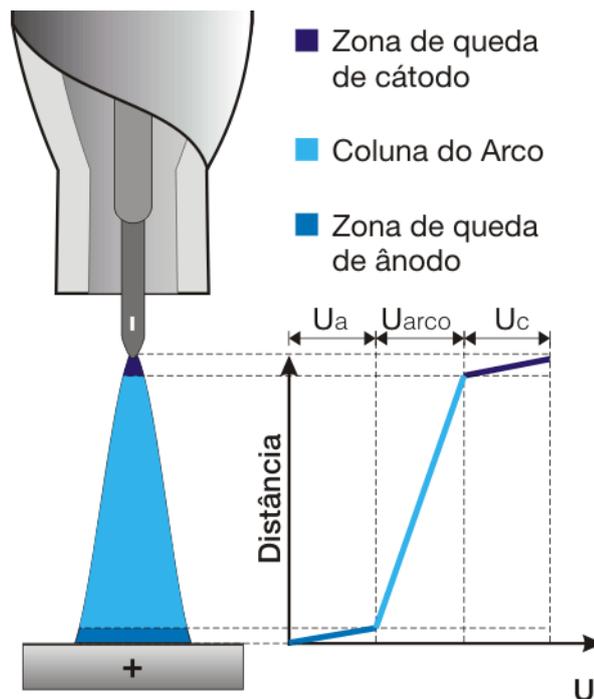


Figura 2.3 – Esquema de distribuição de tensão ao longo de um arco TIG

As regiões de queda anódica e catódica correspondem a diminutas regiões junto aos eletrodos. A soma das quedas de tensão nestas regiões é praticamente constante e independe das condições no qual o arco elétrico é estabelecido. A determinação experimental das tensões de ânodo e cátodo é uma tarefa

extremamente complicada de ser realizada, dado o tamanho reduzido aliado às condições desfavoráveis que o arco elétrico oferece. Entretanto, o somatório dessas tensões pode ser obtido, de forma aproximada, com a extrapolação do comprimento do arco a zero no gráfico que relaciona a tensão e o comprimento do arco. Segundo a literatura (7) este valor de tensão é cerca de 7 V.

A variação da tensão na coluna de plasma ocorre de forma aproximadamente linear com o comprimento do arco, sendo a constante de proporcionalidade correspondente ao campo elétrico presente na coluna de plasma. Este campo elétrico é dependente de vários fatores, em particular da composição do gás de proteção.

2.1.3 Tipos de gases utilizados

A princípio, qualquer gás inerte pode ser utilizado como gás de proteção no processo TIG. Contudo, apenas o argônio e o hélio são utilizados comercialmente devido à disponibilidade e os custos destes gases no mercado. Entre esses dois há vantagens e desvantagens técnicas e econômicas.

A soldagem com hélio proporciona um arco elétrico mais potente e concentrado para uma mesma corrente de soldagem, resultando em cordões de solda mais profundos e estreitos, indicado para as aplicações que fazem uso de chapas espessas, além de materiais que apresentam alta condutibilidade térmica como o cobre. Contudo, como seu maior potencial de ionização (Tabela 2.1) dificulta a abertura e a manutenção da estabilidade do arco, raramente o hélio é utilizado puro.

Além disso, o Argônio possui um peso específico aproximadamente 1,3 vezes maior que do ar e 10 vezes maior que do Hélio, tornando a solda mais imune às influências externas por tornar a proteção gasosa mais eficiente. Já o Hélio, em sendo muito mais leve do que o ar, tende a subir rapidamente e causar turbulências, trazendo o ar da atmosfera de volta para a região do arco elétrico (3).

Em algumas aplicações, como a soldagem dos aços inoxidáveis austeníticos, é perfeitamente viável a utilização de uma mistura de argônio com até 5% de hidrogênio. O emprego de pequenos percentuais de hidrogênio no gás de proteção traz vantagens de melhoria na penetração e na molhabilidade do cordão de solda. Entretanto, tal mistura de gás não pode ser utilizada na soldagem dos outros aços

inoxidáveis, como os ferríticos e martensíticos, devido à fragilização que o hidrogênio provoca em suas microestruturas.

Tabela 2.1 – Potencial de ionização de alguns gases (8)

<i>Elemento ou componente</i>	<i>Eletronvolts (eV)</i>
Argônio	15.8
Hidrogênio	15.4
Hélio	24.6
Nitrogênio	15.6
Oxigênio	12.0
Dióxido de carbono	13.8
<i>Monóxido de carbono</i>	14.1

Durgutlu (9) investigou este efeito da adição de pequenos percentuais de hidrogênio ao argônio como gás de proteção no tocante à microestrutura, penetração e propriedades mecânicas do aço inox austenítico 316L. Como resultado, para as mesmas condições de soldagem, a eficiência de fusão da soldagem TIG aumenta proporcionalmente com o percentual de hidrogênio adicionado, conforme mostra a Figura 2.4.

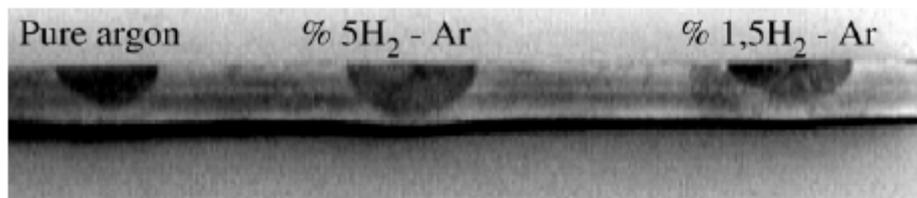


Figura 2.4 – Macrografias de soldas com diferentes percentuais de hidrogênio misturado ao gás de proteção

2.1.4 Eletrodo

Apesar de normalmente receberem a denominação simples de eletrodos de tungstênio, usualmente estes se constituem em ligas de tungstênio com pequenas

quantidades de algum elemento químico para formação de óxidos em suas superfícies. Os principais elementos utilizados são, o Tório (Th), Zircônio (Zr), Lantânio (La) e Cério (Ce). A adição destes elementos ou compostos tem o intuito de oferecer propriedades específicas para o eletrodo, principalmente aumentando a emissividade de elétrons, o que, possibilita ao eletrodo suportar elevadas correntes por um maior período de tempo.

O comprimento total do eletrodo é determinado pelo comprimento que a tocha pode acomodar e, a extensão da ponta do eletrodo para fora do suporte de fixação, determina o quanto o eletrodo irá se aquecer por efeito Joule. Se, por um lado, este aquecimento por efeito Joule representa uma perda de energia, por outro lado auxilia a emissividade de elétrons a partir do eletrodo, uma vez que quanto maior a temperatura do eletrodo, maior a emissividade de elétrons.

2.1.5 Abertura do arco

Existem duas formas de promover a abertura do arco na soldagem TIG. A maneira mais simples consiste no estabelecimento de um curto-circuito entre o eletrodo de tungstênio e a peça de trabalho. Isto faz com que a ponta do eletrodo se aqueça e possa emitir elétrons após o curto ser desfeito, estabelecendo, assim, o arco voltaico. No entanto, se a corrente de curto circuito for alta em relação à bitola e ângulo de afiação do eletrodo, haverá a contaminação do eletrodo com o metal da peça e vice-versa. Para solucionar esse problema é utilizado um sistema chamado de "lift arc". Este se baseia na leitura da tensão do arco para identificar o curto-circuito e, assim, limitar a corrente a um valor suficiente para aquecer o eletrodo e promover a abertura do arco sem danificar ou contaminar o eletrodo de tungstênio e a peça.

Em sistemas automatizados, como é o caso da soldagem orbital TIG, a abertura do arco por meio do curto circuito entre o eletrodo e a peça geralmente não é utilizada, por exigir uma mecanização complexa. Neste caso, a abertura do arco ocorre sem o contato físico do eletrodo de tungstênio e a peça de trabalho, utilizando uma solução conhecida popularmente por sistema de alta frequência. Apesar do nome, estes sistemas realmente operam mediante aplicação de pulsos de alta tensão com uma elevada taxa de variação (dv/dt), o que permite ionizar a atmosfera gasosa existente entre o eletrodo e a peça. A ionização produz centelhas que,

ressalvando a questão de escala, são idênticas ao que se verifica nos relâmpagos da atmosfera (Figura 2.5).



Figura 2.5 – Centelhas produzidas por um circuito de alta frequência

Quando a soldagem é realizada com corrente contínua, estes sistemas são necessários somente na abertura do arco. Porém com corrente alternada senoidal, eles devem ficar atuantes durante toda a soldagem, pois o arco se extingue a cada mudança de polaridade.

Embora sejam extremamente providenciais para a abertura do arco sem contato físico, estes sistemas produzem muitos malefícios para circuitos eletrônicos (principalmente digitais) que operam em conjunto com o equipamento de soldagem ou próximo a ele. Desta forma, estes circuitos eletrônicos devem possuir um bom sistema de isolamento contra as interferências geradas por estes pulsos de tensão, uma vez que os ruídos se propagam pelas conexões elétricas e radiação.

2.1.6 Corrente pulsada

A partir da década de 80, com a evolução das fontes de soldagem, o processo TIG com corrente pulsada passou a ganhar aplicação, principalmente nas soldagens orbitais de tubos.

Nesta variante do processo TIG, as variáveis de regulagem consistem na amplitude e na duração da corrente durante os intervalos de alta energia (pulso) e de baixa energia (base) (Figura 2.6), além da velocidade de soldagem.

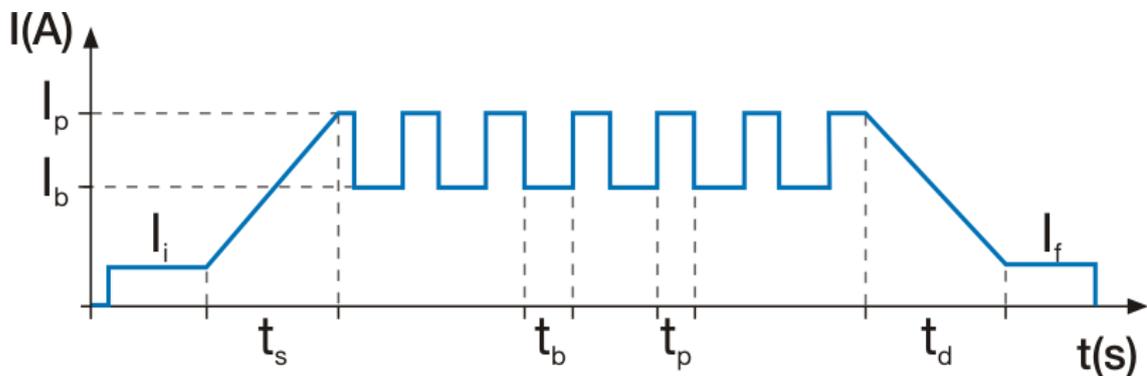


Figura 2.6 – Forma de onda da corrente no processo TIG pulsado

Conceitualmente, durante os intervalos de pulso, um nível alto de energia é regulado para produzir a fusão de um volume de material (pontos de solda), enquanto nos intervalos de base, a energia é mantida em níveis baixos o suficiente para garantir que não ocorra a extinção do arco, o que permite o resfriamento da poça de fusão. O efeito da pulsação da corrente sobre a geometria do cordão de solda resulta em cordões escamados (Figura 2.7), uma vez que a solda é conduzida por vários pontos de solda alinhados (10).

De acordo com a literatura (11)(12) é na alternância de níveis altos e baixos de energia que surgem os benefícios do processo de soldagem TIG pulsado:

- Possibilidade de obtenção de uma geometria de solda mais adequada;
- Agitação da poça de fusão, minimizando a ocorrência de porosidades;
- Possibilidade de ação sobre as estruturas de solidificação;
- Maior controle sobre a poça de fusão, principalmente em posições de soldagem desfavoráveis;

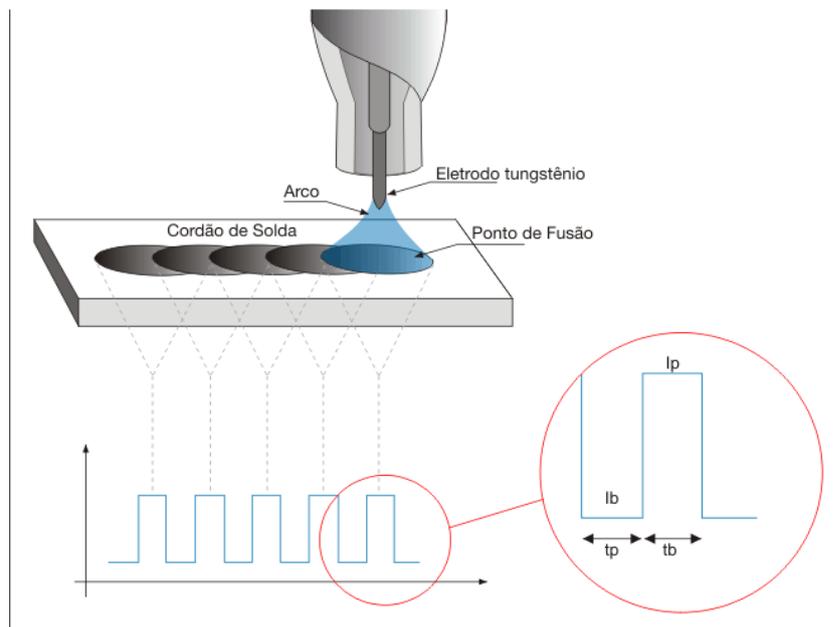


Figura 2.7 – Efeito da forma de onda pulsada sobre o cordão de solda

Embora os efeitos metalúrgicos resultantes destas características citadas, possam ser mensuráveis em algumas situações, normalmente em aços termicamente mais sensíveis, o efeito de ordem operacional da solda é o que mais está presente. Devido à periodicidade da redução da corrente de soldagem, a poça metálica adquire melhores condições de sustentabilidade, propriedade que se faz mais sentir em soldagem fora da posição plana. Isto se reflete fortemente no controle da penetração, seja em passe único para chapas finas, seja para o passe de raiz em chapas mais espessas. Isto é um problema da soldagem quando o lado oposto à solda está sem apoio mecânico, pois é uma situação crítica entre a obtenção de penetração insuficiente e a perfuração da chapa. A passagem de um estado a outro é normal acontecer quando se trabalha com corrente em um único patamar. Em corrente pulsada com variáveis bem reguladas, pode-se obter mais segurança na obtenção de penetração, já que a corrente de pulso estará acima da corrente necessária para aquela penetração, mas atuando durante um tempo tal que a poça metálica adquira um tamanho que ainda se sustente espacialmente. Após o citado tempo, a corrente deve ficar num patamar baixo somente suficiente para

manter o arco. Devido a esta característica, a corrente pulsada é uma técnica indispensável nos sistemas orbitais.

2.2 Sistemas de soldagem orbital TIG

2.2.1 Histórico

Os avanços tecnológicos geralmente encontram-se atrelados ao desenvolvimento de novos métodos e/ou procedimentos capazes de suprir alguma demanda existente, que se constitui numa barreira momentânea. Diversos são os exemplos que mostram que as barreiras tecnológicas só foram suplantadas após ser desenvolvida uma nova metodologia ou procedimento para atender tal demanda. Dentre estes exemplos, encontra-se a indústria aeroespacial, que com o desenvolvimento de aeronaves cada vez mais velozes e potentes passou a sentir a necessidade de fabricar componentes de alta integridade. Dentro deste contexto, ao verificar que as tubulações das aeronaves apresentavam falhas durante os vôos, engenheiros da indústria aeroespacial desenvolveram, na década de 1960, a soldagem orbital TIG, com a finalidade de proporcionar soldas de união de tubos de linhas hidráulicas com maior robustez. Todavia, este sistema passou a ser empregado de fato pela indústria somente em meados dos anos 80, com o advento de sistemas de soldagem dedicados (13).

2.2.2 Estrutura de um sistema de soldagem orbital

Sistemas de soldagem orbital TIG constituem-se numa versão mecanizada da soldagem TIG dedicada à soldagem de tubos. Estes sistemas são constituídos basicamente por uma unidade de controle, uma fonte de soldagem e um cabeçote orbital (14).

Sistemas modernos de soldagem orbital possuem o seu controle baseado em sistemas computadorizados que permitem o armazenamento das variáveis de soldagem em sua memória (15). Nestes, a unidade de controle encontra-se embutida na fonte de soldagem, constituindo-se num único bloco do sistema (16). A unidade de controle é responsável por controlar todas as variáveis do processo, como corrente e velocidade de soldagem, e alterá-las de acordo com a posição do

eletrodo em relação ao tubo. A fonte de soldagem a ser empregada no equipamento, deve ser compacta e portátil para atender aos requisitos de portabilidade exigidos pelo equipamento. Tendo em vista que o sistema opera com o processo de soldagem TIG, a mesma deve ser do tipo corrente constante, podendo operar no modo corrente contínua constante, pulsada ou em corrente alternada. Sua seqüência de soldagem é definida pela unidade de controle.

Na soldagem orbital, os tubos a serem soldados, assim como o próprio cabeçote de soldagem, permanecem estacionários, enquanto o eletrodo de tungstênio é rotacionado em torno da junta a ser soldada. Este deslocamento angular do eletrodo é realizado por um mecanismo cinemático montado no interior do cabeçote orbital. Este se constitui no principal componente do sistema. Basicamente existem três tipos de cabeçotes orbitais, os de câmara fechada, os de câmara aberta e os orbitais de superfície (15), sendo este último menos empregado na indústria por sofrer concorrência direta do processo conhecido como “remanche”, o qual é um processo de conformação mecânica.

a) Cabeçote de câmara fechada

Dentre os cabeçotes orbitais comerciais, o mais comum é o do tipo câmara fechada (Figura 2.8). Este tipo de cabeçote possui um sistema de fixação e alinhamento dos tubos, que quando fechado cria um ambiente que enclausura toda a região a ser soldada. Este ambiente, onde ocorre a soldagem, é totalmente preenchido com gás inerte de modo a proteger a poça de fusão e o eletrodo. Este tipo de cabeçote orbital é utilizado em tubos com diâmetro externo de 2 mm a 170 mm e espessura de parede de até 4 mm (17).



Figura 2.8 – Cabeçote orbital de câmara fechada (18)

b) Cabeçote de câmara aberta

Os cabeçotes de câmara aberta (Figura 2.9) são indicados para espessuras da parede do tubo superiores a 3,5 mm, quando se faz necessária a adição de material (17). Além disso, neste tipo de cabeçote a distância entre o eletrodo e a peça pode ser controlada por um AVC (arc voltage control), permitindo assim a consistência do cordão de solda em tubos que apresentam excentricidade.



Figura 2.9 – Cabeçote orbital de câmara aberta (19)

CAPÍTULO 3

HISTÓRICO DO DESENVOLVIMENTO DA SOLDAGEM TIG ORBITAL NO LABSOLDA

3.1 Introdução

A linha de pesquisa relativa à soldagem orbital TIG foi iniciada no LABSOLDA há cerca de sete anos. No decorrer desse período este desenvolvimento passou por várias fases e frentes de trabalho. O texto a seguir relata a trajetória deste desenvolvimento.

3.2 Primeira fase: Projeto e construção de um primeiro protótipo do cabeçote orbital

No ano de 2001 foi iniciada, esta linha de pesquisa e desenvolvimento no âmbito de um trabalho de graduação, com o aluno Gilson Arima, orientado pelo Dr. Eng. Carlos E. I. Baixo. Foi realizado todo um estudo preliminar a fim de identificar as principais vantagens e desvantagens dos diversos tipos de equipamentos existentes no mercado e assim definir as características operacionais desejadas para o cabeçote orbital a ser projetado nesta primeira etapa do desenvolvimento.

Os resultados dos estudos realizados direcionaram o desenvolvimento para uma concepção baseada no princípio de cartucho (Figura 3.1). Esta concepção foi considerada mais adequada do que a outra investigada que emprega engrenagens bipartidas, que apresenta maior complexidade de operação (20).

Nesta concepção o conjunto de acionamento é acoplado ao conjunto posicionador através de grampos de engate rápido, o que possibilita maior agilidade na montagem do equipamento.

Uma vez definida a concepção adotada, o passo seguinte foi o de determinar o diâmetro dos tubos suportados pelo cabeçote orbital, sendo que foi optado por desenvolver um equipamento para a soldagem de tubos com diâmetro externo de até 76 mm. Apesar de não ser usual tamanha faixa operacional, tal concepção permitiria ampliar a faixa de aplicação do protótipo, envolvendo, tanto a montagem

de equipamentos, quanto de linhas de transporte na indústria de extração e refino de petróleo.

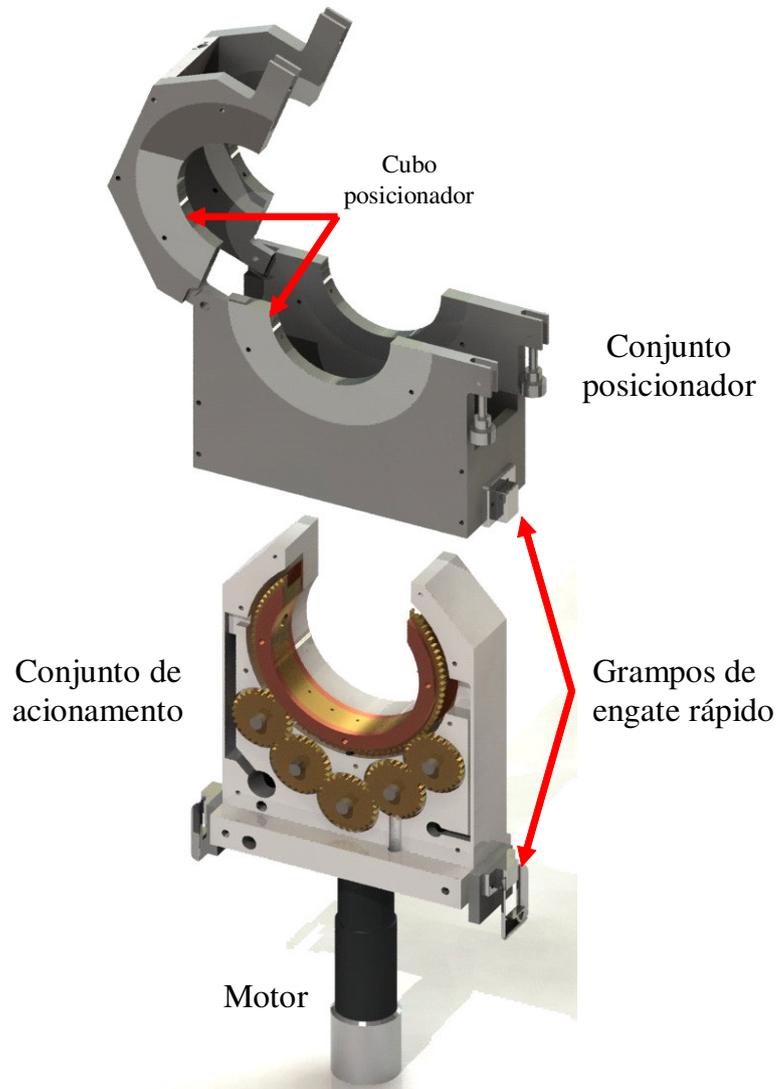


Figura 3.1 – Concepção baseada no princípio de cartucho

Definida as características operacionais desejadas para o cabeçote orbital a ser projetado passou-se então para a etapa de modelagem CAD do protótipo. Dentre os diversos modelos gerados em ambiente CAD, foi identificada a solução que melhor atendeu as necessidades cinemáticas do equipamento (Figura 3.2).

Para chegar a esta configuração, vários conjuntos de engrenagens foram modelados visando obter o menor volume e, conseqüentemente, a menor massa para o conjunto. Dentre as soluções analisadas, chegou-se a cogitar o emprego de

engrenagens helicoidais devido a maior suavidade de contato e menor vibração neste tipo de transmissão. Entretanto, devido a dificuldade de fabricação, estas acabaram sendo descartadas, passando-se a considerar as engrenagens cilíndricas de dentes retos.

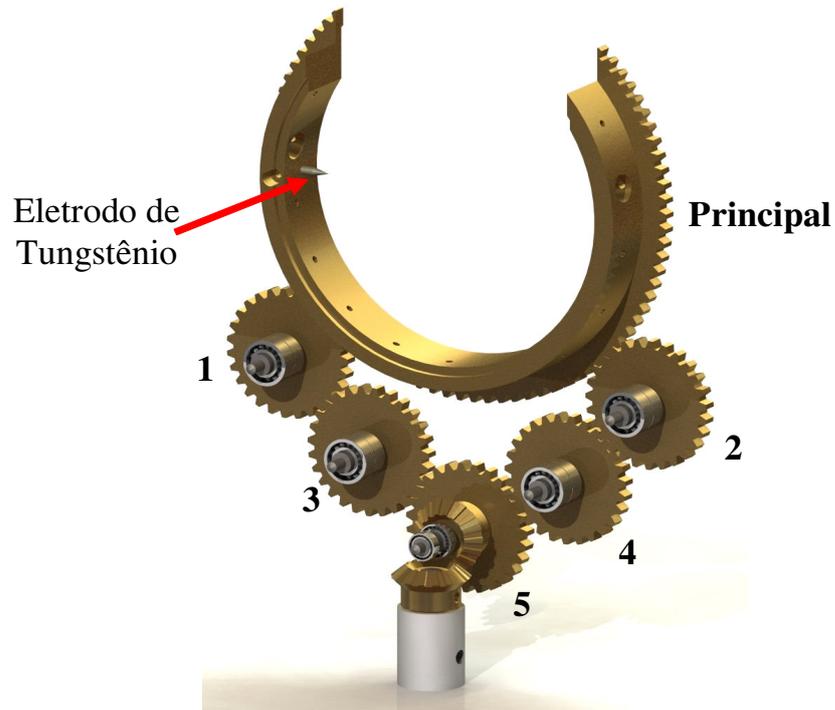


Figura 3.2 – Modelo cinemático gerado em ambiente CAD

Dado ao fato da engrenagem que transporta o eletrodo de tungstênio (engrenagem principal) apresentar um corte para a passagem dos tubos, a disposição das engrenagens (1 a 5) foram concebidas de forma a garantir, durante todo o movimento, no mínimo um ponto de apoio para a engrenagem principal. Deve-se considerar que o carregamento é crítico quando esta engrenagem está acionada somente por uma das engrenagens 1 ou 2, conforme mostra a Figura 3.3.

Depois de definido o modelo dimensional (21), o conjunto do mini motor e redutor planetário foram dimensionados com base nos cálculos realizados para determinar o torque e a potência necessária para o acionamento mecânico do conjunto cinemático.

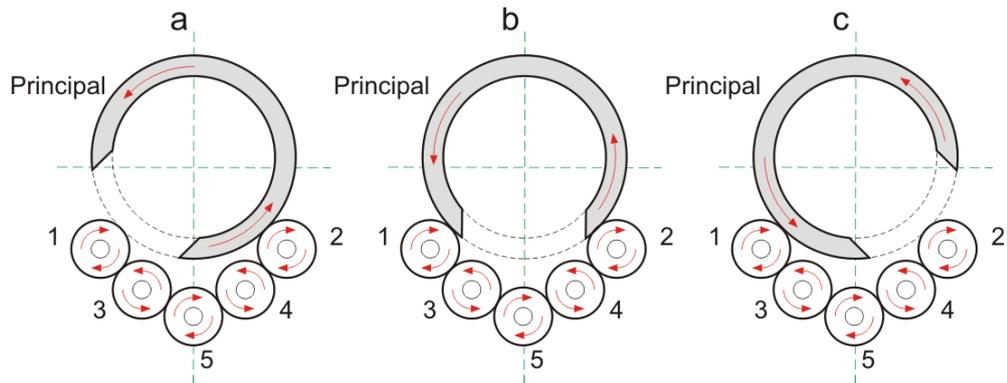


Figura 3.3 – Cinemática do sistema rotativo. Em (a) e (c) carregamento crítico e em (b) carregamento normal

Depois de finalizada a etapa de projeto, foi construído um primeiro protótipo do cabeçote orbital (20), conforme mostra a Figura 3.4. Este desenvolvimento resultou no agraciamento do prêmio PRODUCT em 2002, na categoria graduação, hoje prêmio Petrobrás de tecnologia.



Figura 3.4 – Primeiro protótipo do cabeçote orbital

3.3 Segunda fase: Construção de um segundo protótipo do cabeçote orbital

Com a conclusão do curso de engenharia mecânica no primeiro semestre de 2002, o bolsista Gilson Arima se desligou do LABSOLDA e o projeto passou a ser conduzido pelo bolsista Jarbas Renato Bortolini. Este iniciou suas atividades no projeto realizando os ensaios de desempenho do primeiro protótipo do cabeçote orbital, no qual foi identificado que alguns componentes se mostravam insatisfatórios quanto à correta operacionalidade do equipamento.

Um dos problemas encontrados foi à dificuldade de garantir um contato elétrico adequado entre o terminal-mancal de corrente e a engrenagem que transporta o eletrodo de tungstênio (Figura 3.5). Isto consistia num problema crítico, pois o contato elétrico deficiente causa o aumento pontual de resistência elétrica, resultando num aquecimento indesejável ocasionado por efeito joule, acelerando o desgaste do componente e assim reduzindo a vida útil do cabeçote orbital.

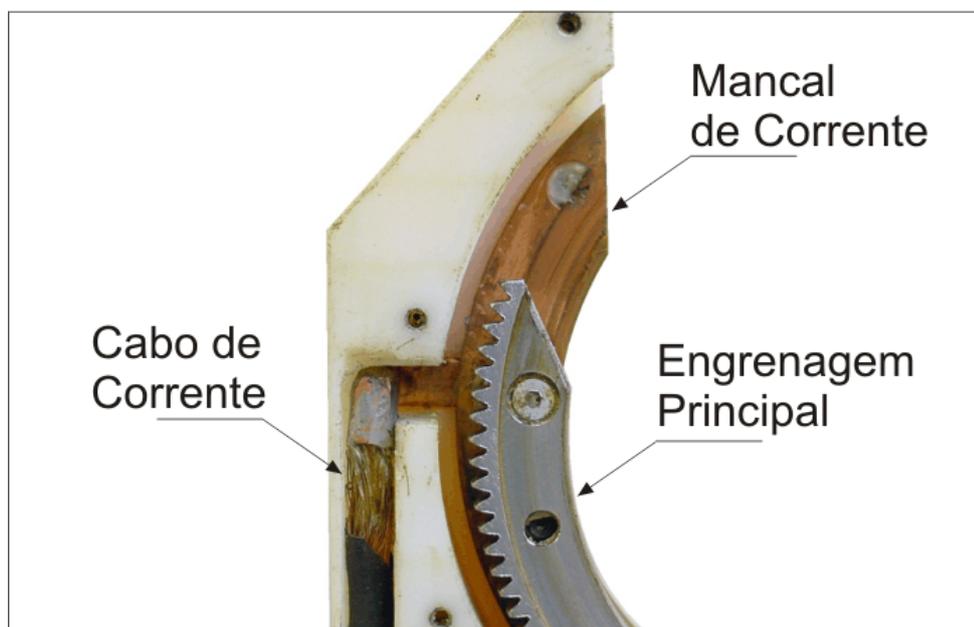


Figura 3.5 – Contato elétrico entre o mancal e a engrenagem principal

A solução encontrada para esse problema foi o desenvolvimento de um componente, denominado mancal mola, que atuando como uma mola mantém a

engrenagem que transporta o eletrodo de tungstênio, pressionada contra o terminal-mancal de corrente (Figura 3.6).



Figura 3.6 – Terminal-mancal mola desenvolvido

O emprego do latão na confecção de alguns componentes como o próprio mancal, também não se mostrou satisfatório por apresentar baixa condutibilidade térmica, neste sendo substituído por cobre. Outros problemas foram identificados, como:

- Sistema de fechamento do conjunto posicionador deficiente;
- Material utilizado na confecção do conjunto posicionador inadequado;
- Problemas de acoplamento nas engrenagens do conjunto cinemático.

A identificação dos problemas ocorridos no primeiro protótipo conduziu o bolsista a uma etapa de reprojeto de componentes do cabeçote orbital. A Figura 3.7 mostra o resultado de todos estes esforços realizados para conceber um cabeçote orbital com requisitos satisfatórios para operações de soldagem.

Com a conclusão do trabalho de reprojeto, uma bancada foi montada e foram realizados os primeiros ensaios de solda (22). Na ocasião foi utilizada uma fonte de soldagem DIGITEC 450 para fornecer a energia necessária para o arco. O acionamento do cabeçote orbital foi realizado com uma fonte de tensão regulável para permitir a regulação da velocidade de deslocamento do eletrodo.



Figura 3.7 – Segundo protótipo do cabeçote orbital

Foram realizados ensaios de soldagem com corrente contínua constante e corrente pulsada. Em ambos os casos o cabeçote orbital realizou o correto deslocamento do eletrodo, conduzindo o arco voltaico em torno dos tubos de forma suave sem grandes trepidações. Contudo, a ausência de uma unidade de controle capaz de comandar o deslocamento do eletrodo, comprometeu a qualidade dos cordões realizados, tendo em vista que o cabeçote orbital é fechado e fica difícil ver exatamente quando a solda deve ser finalizada.

3.4 Terceira fase: Desenvolvimento da unidade de controle

Com a conclusão do segundo protótipo do cabeçote orbital, obteve-se um equipamento bem próximo do almejado inicialmente. Desta forma, o aluno de mestrado Carlos Eduardo Broering no início do ano de 2003 passou a conduzir o próximo passo no desenvolvimento do sistema de soldagem orbital TIG que

consistiu no desenvolvimento da unidade de controle do sistema. Para tanto, foi montada uma bancada, conforme é mostrada na Figura 3.8.

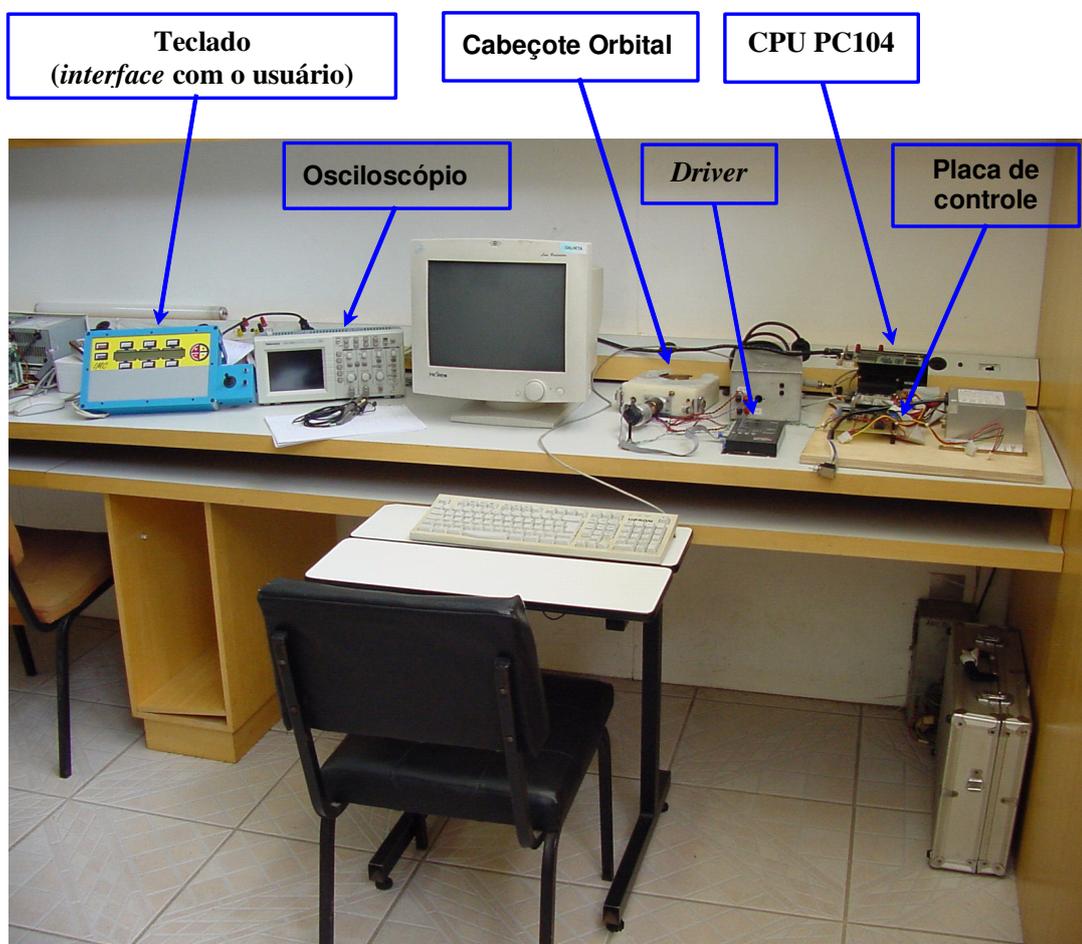


Figura 3.8 – Bancada de desenvolvimento da unidade de controle (23)

Esta bancada foi equipada com um computador, cabeçote orbital e todos os componentes necessários para o desenvolvimento da unidade de controle do sistema (osciloscópio, fontes, multímetros). Antes de definir a unidade de controle a ser desenvolvida, foi necessário determinar a estrutura adotada para o sistema como um todo. Esta estrutura (Figura 3.9) contempla uma CPU principal que recebe, utilizando a comunicação serial RS-232, as informações dos parâmetros de soldagem configurados pelo usuário em um teclado de comando remoto. Ao ser iniciada a solda, a CPU envia para o “driver” do motor, pela placa de interface e controle, a tensão de referência da velocidade de deslocamento do eletrodo, bem como a referência de corrente para a fonte de soldagem.

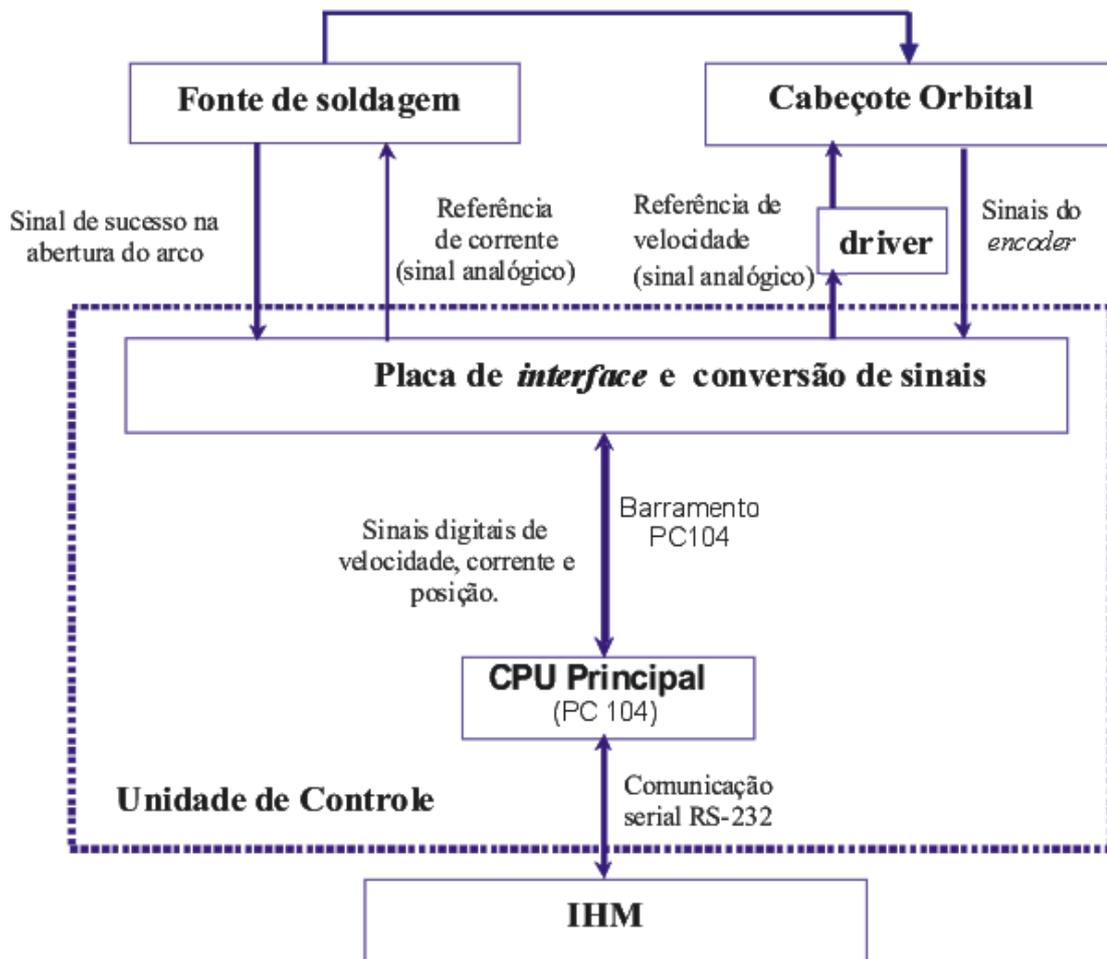


Figura 3.9 – Estrutura adotada no desenvolvimento do sistema de soldagem TIG orbital (23)

Como se pode observar na Figura 3.9, a unidade de controle é composta por uma CPU principal (PC104) e uma placa de interface e controle. O PC104 constitui-se numa placa mãe de uso industrial, além desta apresentar dimensões reduzidas, a mesma é equipada com um barramento ISA, cujo formato físico é conhecido pelo nome de PC104.

A placa de interface e controle (Figura 3.10) é dividida em dois blocos funcionais. Um contém um microcontrolador da família 8051, que realiza a conversão dos sinais do encoder de incremental para absoluto. Esta conversão é realizada por um programa específico desenvolvido em linguagem C para o microcontrolador. O outro bloco é composto por um conjunto de amplificadores operacionais que são

responsáveis por adequar os valores analógicos de referência de corrente para a fonte de soldagem e velocidade de deslocamento para o driver do motor DC.

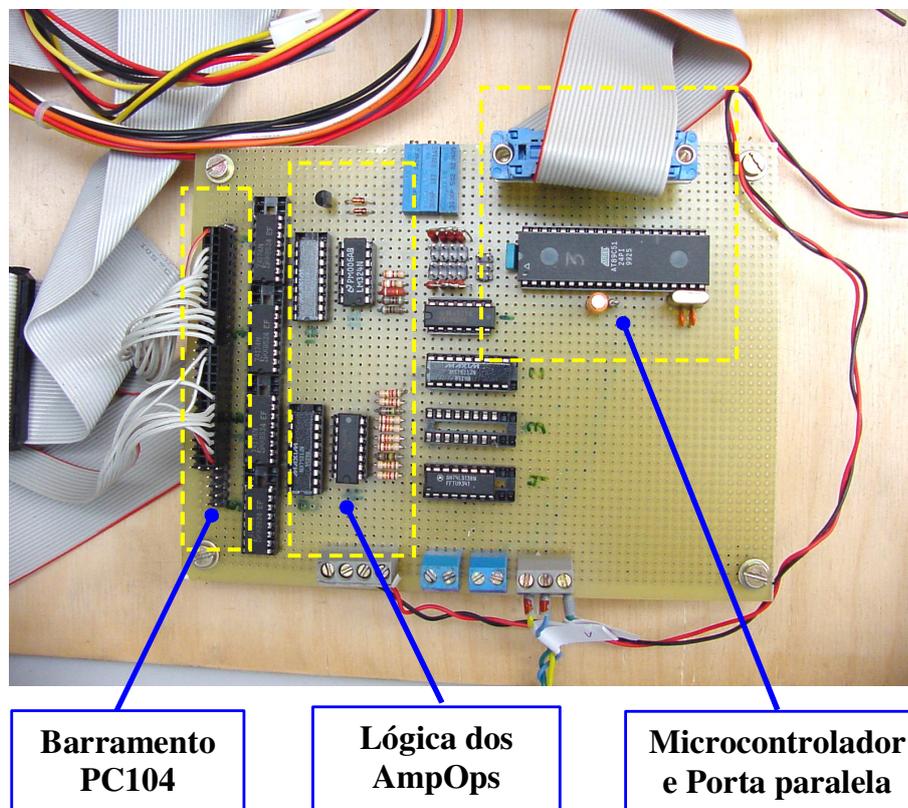


Figura 3.10 – Protótipo da placa de interface e controle (23)

Tendo em vista que o driver selecionado para o acionamento do motor DC possui o seu sinal de entrada do tipo analógico, significa que a malha de controle de velocidade do cabeçote orbital deve ser realizada pelo programa principal de controle do equipamento, exigindo uma maior capacidade de processamento do sistema, além de tornar a programação mais trabalhosa e a implementação do hardware mais complexa. Isto, somado a outras atividades realizadas durante o seu trabalho de pós-graduação (que direcionaram o seu trabalho para o desenvolvimento de outro equipamento), fez com que o mestrando não concluísse o desenvolvimento da unidade de controle e do software de controle do equipamento. Conseqüentemente, o cabeçote orbital continuou a operar sem que houvesse um circuito capaz de sincronizar o deslocamento do eletrodo e a corrente de soldagem de acordo com a posição no tubo.

3.5 Quarta fase: Continuação do desenvolvimento da unidade de controle

Para dar continuidade ao desenvolvimento da unidade de controle do sistema orbital, no ano de 2005 o projeto passou a ser conduzido pelo bolsista Renon Steinbach Carvalho e o Professor Nelso Gauze Bonacorso do CEFET-SC. Ambos montaram uma nova bancada de trabalho (Figura 3.11), sendo a mesma composta pelo cabeçote orbital, servo driver, placa de fontes auxiliares e geração de sinal.



Figura 3.11 – Bancada de desenvolvimento montada no CEFET-SC

Nesta nova fase do desenvolvimento, um dos objetivos foi o de substituir a CPU, baseada no PC104, pela placa microcontrolada utilizada no controle da fonte de soldagem DIGITEC 450 (24). Apesar da placa microcontrolada não possuir capacidade de processamento para realizar a malha de controle de velocidade do motor, esta alteração foi realizada visando à redução do custo final do equipamento numa futura produção para comercialização.

Assim, com o intuito de viabilizar o uso da placa microcontrolada, e ao mesmo tempo reduzir a complexidade de implementação do software de controle, utilizou-se o servo driver R2010 (Figura 3.12), fabricado pela empresa Rutex.



Figura 3.12 – Servo driver R2010 fabricado pela empresa rutex

Este realiza o acionamento de motores DC a partir de sinais de controle para motor de passo (STEP/DIR). Para tanto, os sinais do encoder são conectados diretamente ao servo driver, que se encarrega de fechar a malha de controle de posição do motor. Além disso, este servo driver possui as seguintes características:

- Acionamento de motores DC com escovas até 100 V/20A;
- Proteções contra sobre e sub tensão, corrente de pico, erro de seguimento;
- Comunicação com encoder diferencial de três canais;
- Baixo custo;
- Compensador P.I.D. e variáveis ajustáveis via software;

Este servo driver é configurado por um software chamado R2xTuneVB6 (Figura 3.13), sendo que o mesmo opera em plataforma Windows e controla o driver através da porta paralela do computador. Além de ajustar o controlador P.I.D., são também configuradas uma grande gama de variáveis, tais como: inversão de polaridade do servo motor, configuração do encoder, corrente limite e valor admissível para o erro de seguimento.

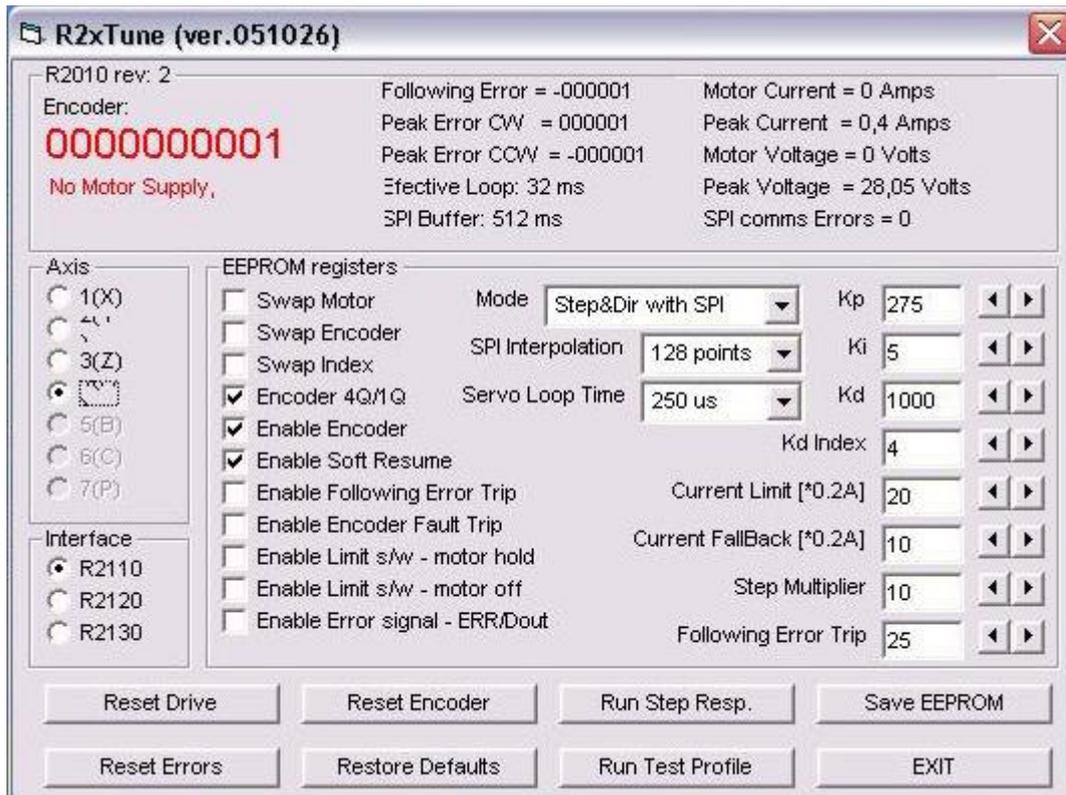


Figura 3.13 – Tela do programa de configuração do servo driver

O processo de configuração do servo driver pode ser dividido em configuração das variáveis e ajuste da dinâmica do sistema.

- a) **Configuração das variáveis:** Configuram-se as variáveis do servo motor, do encoder e das proteções. Dentre os ajustes do servo motor têm-se a polaridade e a corrente eficaz de regime. O encoder é configurado para operar ou não em modo de quadratura. Nas opções de proteção, define-se o valor limite da corrente de pico e o número máximo de passos tolerados para que ocorra erro de seguimento.
- b) **Ajuste da dinâmica do sistema:** Com o conjunto montado (servo driver, motor, carga) coloca-se o sistema a operar com o acionamento em modo degrau. Inicialmente eleva-se o ganho proporcional (Kp) até o sistema começar a entrar em oscilação. Na seqüência aumenta-se o ganho derivativo (Kd) com o intuito de diminuir a oscilação do sistema. Por fim, ajusta-se o ganho integral (Ki), visando eliminar o erro de regime permanente.

Concluído o processo de configuração, o servo driver pode ser desconectado do computador e operar conectado ao sistema de soldagem orbital TIG.

Com o objetivo de validar o comportamento do sistema, sobretudo do driver R2010, foram realizados testes preliminares de acionamento, principalmente durante a abertura do arco, onde os efeitos nocivos da alta frequência estão presentes. Para tanto, foi desenvolvida uma placa equipada com fontes de alimentação para o servo driver e motor DC, além de um circuito de geração de sinais que simula a CPU (Figura 3.14).

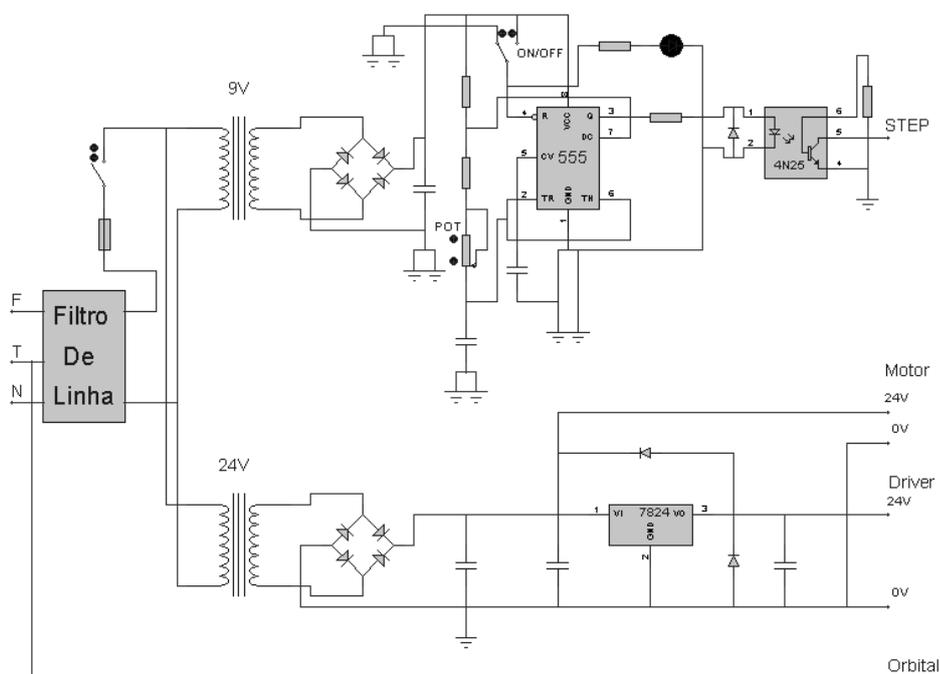


Figura 3.14 – Circuito de fontes auxiliares e geração de sinal

Na entrada da placa foi colocado um filtro de linha para tornar o servo driver mais imune às interferências eletromagnéticas que, por ventura se propagam pela rede elétrica. Para a geração do sinal de STEP foi utilizado o CI 555 funcionando como astável, configuração no qual o circuito se comporta como um oscilador, sendo este sinal isolado por um optoacoplador 4N25. A frequência dos pulsos gerada por este circuito é alterada atuando-se num potenciômetro. Assim pôde-se obter o ajuste de velocidade de deslocamento do eletrodo de tungstênio.

Um dos grandes problemas encontrado durante a realização de testes experimentais foi os efeitos causados pela alta frequência durante a abertura do arco. As interferências colocavam em risco a integridade, tanto do encoder, quanto do servo “driver”. Para solucionar esse problema foi construída uma blindagem para os dois componentes citados, visando, assim, reduzir ao máximo a intensidade das ondas eletromagnéticas no qual incidiam sobre estes componentes. Além disso, foi realizada a troca do “flat cable” do encoder por um cabo blindado composto por três pares de fios trançados.

Com a conclusão do curso de tecnologia em controle e automação, o bolsista Renon Steinbach Carvalho não pôde dar continuidade aos desenvolvimentos previstos, sendo assim, foi interrompido o projeto.

CAPITULO 4

DESENVOLVIMENTO DA ARQUITETURA FINAL DO SISTEMA DE SOLDAGEM ORBITAL

4.1 Introdução

Apesar de vários anos de desenvolvimento, o almejado sistema de soldagem TIG orbital continuava apenas como promessa. Mesmo com toda a política de desenvolvimento empreendida pela equipe do LABSOLDA, não se via de forma consistente, os resultados esperados no referido desenvolvimento. O cabeçote orbital idealizado nunca havia funcionado integrado num sistema de soldagem orbital como um todo, sendo realizados apenas ensaios de soldagem para verificar o seu funcionamento. Com relação à unidade de controle pretendida, esta dispunha apenas do conjunto de acionamento (servo driver e encoder).

Diante do estado no qual se encontrava o desenvolvimento após anos, a equipe do LABSOLDA começou a apresentar certo desconforto com esta situação. Assim, com o intuito de finalizar este desenvolvimento, ou pelo menos de se ter um protótipo de um sistema de soldagem orbital TIG de fato, foi decidido que o trabalho complementar deveria ser tema desta dissertação de mestrado, mas inserindo no contexto o desenvolvimento de uma metodologia que auxiliasse na determinação das variáveis de soldagem TIG pulsada.

Inicialmente foi necessário definir novamente a concepção a ser adota para o sistema de soldagem orbital (25). Uma possibilidade era a estrutura que integrava num único bloco do sistema a fonte de soldagem e a unidade de controle, opção que se mostrou bastante interessante por eliminar um bloco do sistema e, assim, reduzir o número de conexões. Entretanto, devido aos problemas relativos à alta frequência já revelados em testes preliminares (ver item 3.5), optou-se por uma estrutura mais conservadora que utiliza quatro blocos, conforme mostra a Figura 4.1.

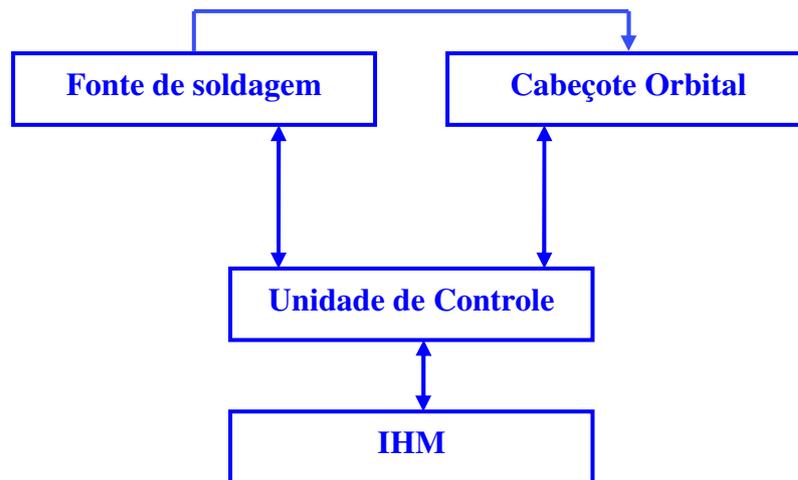


Figura 4.1 – Estrutura adotada no desenvolvimento do cabeçote orbital

4.2 Unidade de controle

Uma vez definida a estrutura a ser utilizada, partiu-se para o desenvolvimento da unidade de controle do sistema, utilizando como componentes o servo driver e a placa microcontrolada. A unidade de controle projetada é composta por uma placa microcontrolada (CPU), servo driver, placa de isolamento e as fontes necessárias para alimentar todo o sistema (Figura 4.2).

A placa microcontrolada (CPU) incorpora dois sistemas microcontrolados operando simultaneamente em paralelo, chamados de CTRA e CTRB. O sistema referente ao CTRA é responsável pelo gerenciamento do equipamento como um todo, ou seja, este é quem realiza o procedimento de inicialização do equipamento, armazenamento e recuperação das variáveis, gerenciamento das proteções, além da comunicação com o teclado remoto. Já o sistema de CTRB é responsável pelas operações diretamente ligadas ao processo de soldagem, tais como gerar as formas de onda da corrente e os sinais de controle para o servo driver e a fonte de soldagem.

Quando o equipamento é ligado, o CTRA recupera de sua memória as variáveis do processo e as disponibiliza, pelo teclado de comando remoto, para que possam ser visualizadas ou alteradas pelo usuário. No momento em que a solda é habilitada, o CTRA envia o valor das variáveis para o CTRB por meio de uma comunicação serial padrão I²C (26), e ao ser disparado o processo de soldagem, o CTRB, fazendo

uso de temporizadores específicos, monta as formas de onda da corrente e dos sinais de controle do cabeçote orbital e da fonte de soldagem.

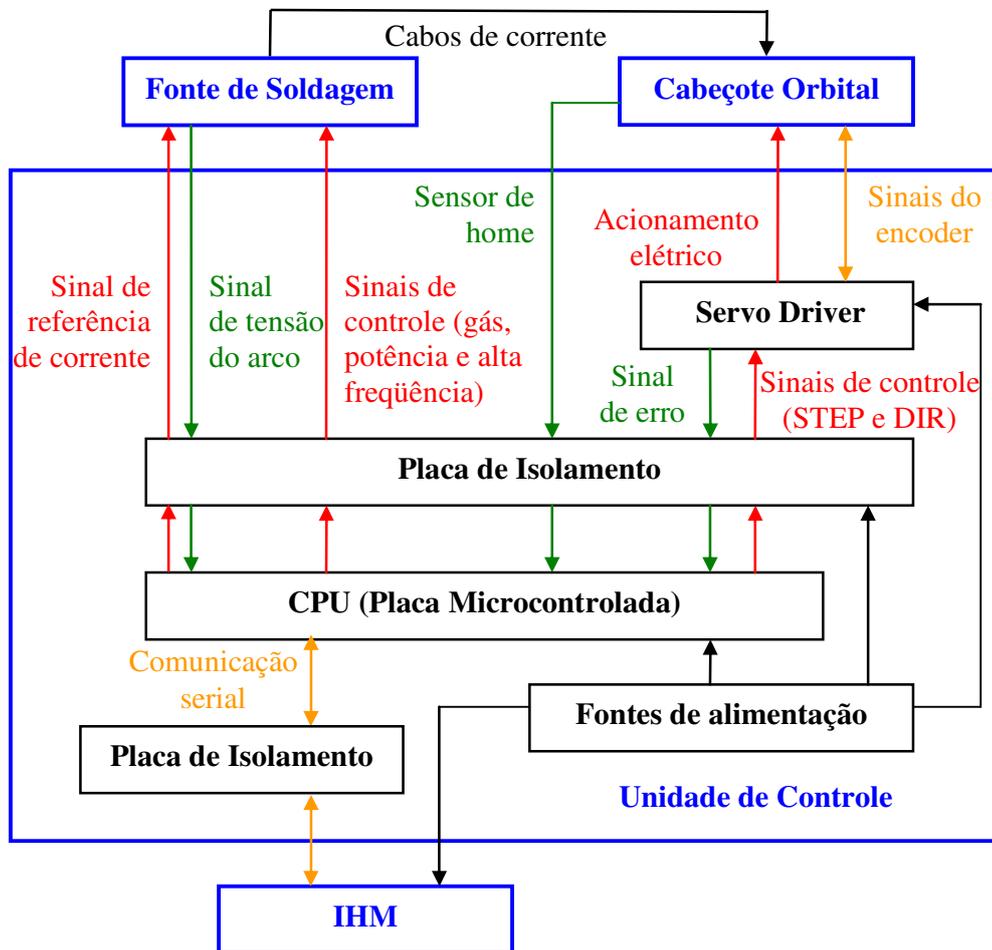


Figura 4.2 – Detalhamento da unidade de controle

Para permitir o controle do processo de soldagem, o sistema correspondente ao CTRB dispõe de um conversor digital analógico de 12 bit para enviar à fonte de soldagem o sinal de referência de corrente e um conversor analógico digital de 8 bit para realizar a leitura da tensão do arco. Os demais sinais de controle, tanto da fonte de soldagem, quanto do cabeçote orbital, são todos digitais.

Em virtude deste sistema de soldagem orbital utilizar o processo TIG com abertura de arco por meio de um sistema de ignição que emite elevados níveis de ruídos eletromagnéticos extremamente nocivos para os circuitos eletrônicos digitais, se fez necessário prever a implementação de uma placa de isolamento elétrico para

todos os sinais, tanto de entrada como de saída, da placa microcontrolada. Esta placa realiza o isolamento em três módulos (Figura 4.3).

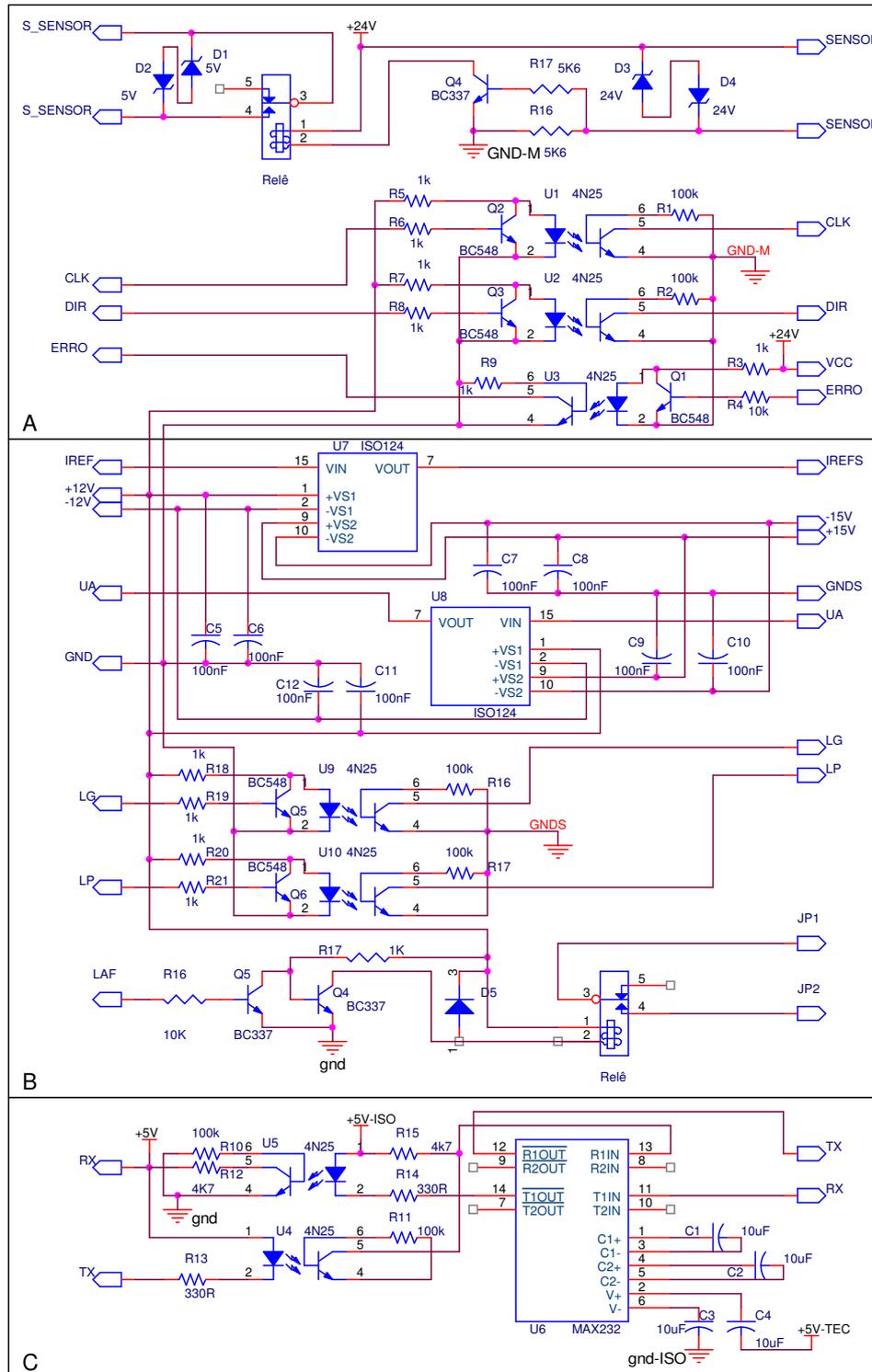


Figura 4.3 – Circuito de isolamento de sinais. Em (a) Isolamento dos sinais do cabeçote, em (b) Isolamento dos sinais da fonte de soldagem e em (c) isolamento dos sinais do teclado de comando remoto

No primeiro módulo foi implementado o isolamento dos sinais relativos ao acionamento do cabeçote orbital. Neste, o isolamento dos sinais de DIR (sentido de giro), CLK (velocidade de deslocamento do eletrodo) e ERRO (erro de seguimento), foram realizados por opto acopladores. Já o sinal do sensor de HOME, que identifica a posição zero do sistema, foi isolado com relé (Figura 4.3), com o intuito de tornar mais robusto o seu isolamento, uma vez que o sensor de HOME encontra-se instalado no interior do cabeçote orbital, e, portanto, sujeito a maiores interferências eletromagnéticas.

No segundo módulo implementou-se o isolamento dos sinais que transitam entre a fonte de soldagem e a placa microcontrolada. Para os dois sinais digitais LP (liga potência) e LG (liga gás) foram utilizados opto acopladores e para o sinal de acionamento da alta frequência um relé, tendo em vista que este sinal é conectado diretamente ao circuito eletrônico responsável por gerar a alta frequência. Além destes sinais, necessitava-se também realizar o isolamento de dois sinais analógicos, UA (sinal de tensão do arco) e IREF (sinal de referência da corrente de soldagem). Para tanto, foi utilizado o circuito integrado ISO 124, que se constitui numa espécie de amplificador operacional com opto isolamento integrado.

Por fim, no terceiro módulo implementou-se o isolamento dos sinais da comunicação serial RS-232 entre a unidade de controle e o teclado de comando remoto. Neste tipo de comunicação, os sinais de tensão são convertidos de TTL (0 e 5 V) em +12 e -12 V, respectivamente, antes de serem transmitidos, com a finalidade de reduzir as interferências durante a transmissão. No entanto, isto não é o suficiente para inibir os efeitos ocasionados pela alta frequência. Por isso, foram instalados opto acopladores adicionais, como pode ser visto na Figura 4.3.

Em circuitos eletrônicos para um efetivo isolamento dos sinais é necessário também que as fontes de alimentação sejam isoladas eletricamente. Desta forma, tendo em vista que a placa de isolamento de sinais é dividida em três módulos, fez-se necessário à utilização de três fontes de alimentação independentes. Assim, para alimentar a placa microcontrolada foi utilizada uma fonte de alimentação de microcomputador, pois esta já disponibiliza as três tensões necessárias (+12 V, +5 V e -12 V). Para a alimentação do servo driver e do motor DC foi utilizada a fonte de alimentação da Figura 3.14 e para alimentar o teclado de comando remoto uma fonte de 5 V.

A Figura 4.4 mostra o protótipo da unidade de controle desenvolvida.

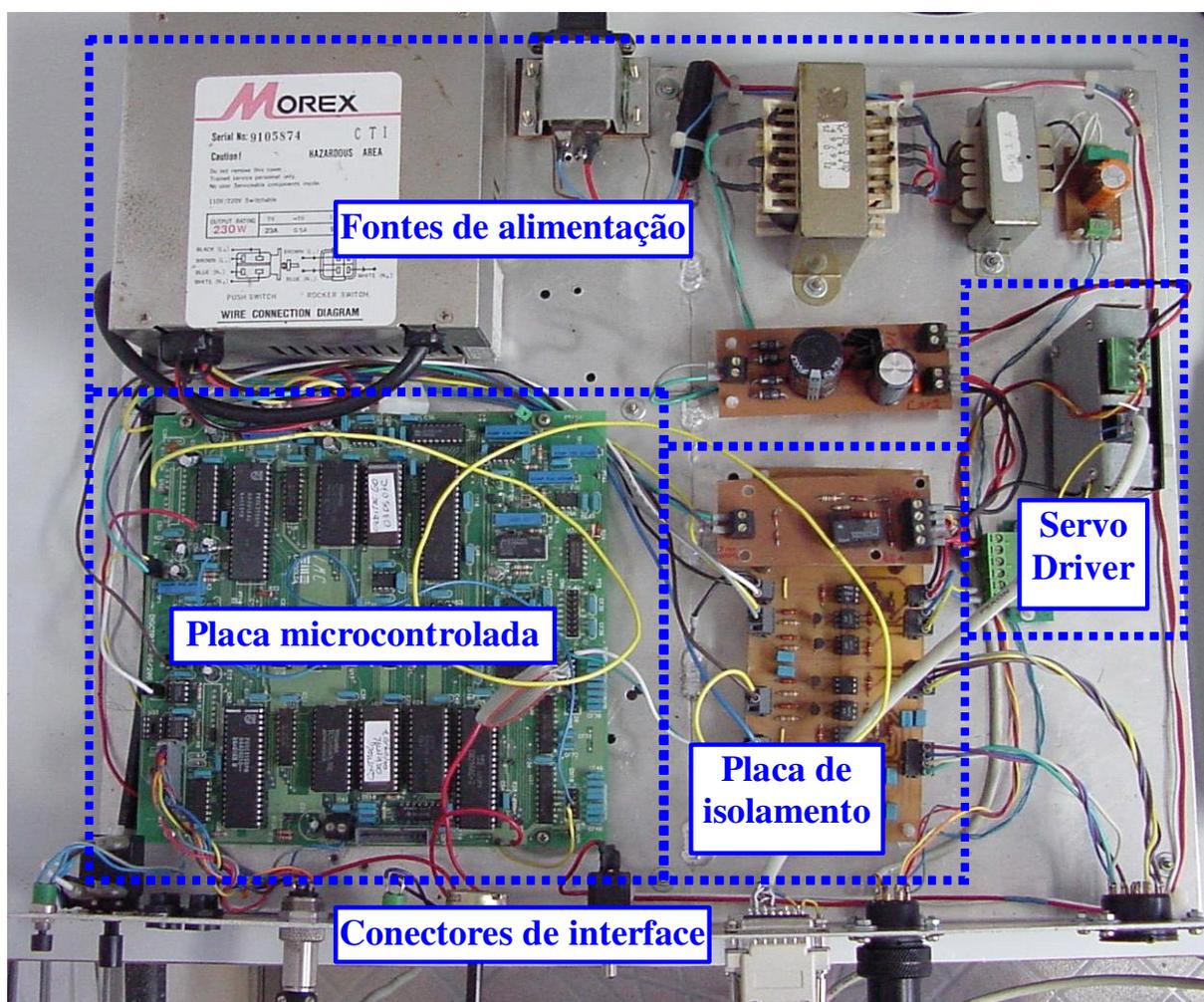


Figura 4.4 – Protótipo da unidade de controle

4.3 Cabeçote orbital

Com o desenvolvimento do hardware da unidade de controle, o próximo passo foi a integração da mesma aos outros componentes do sistema de soldagem orbital. Como ponto de partida, iniciou-se pela integração da unidade de controle ao cabeçote orbital. Contudo, apesar deste cabeçote orbital já ter funcionado em testes preliminares, o mesmo ainda não era capaz a operar de forma integrada à unidade de controle. Para tornar isto possível, se fazia necessário instalar os cabos para a sua interface (mangote), além do sensor de HOME.

Na construção do mangote de conexões elétricas e de comando foi utilizado um cabo para os sinais do encoder, um para a alimentação do motor DC, um para o sinal de HOME e dois cabos de corrente, além da mangueira de gás. Este número grande de cabos é resultado do isolamento individualizado que foi realizado, sendo que suas respectivas blindagens foram ligadas à malha de isolamento. Contudo, para reduzir o número de conexões, o cabo de alimentação do motor DC e o cabo do sinal de HOME compartilham o mesmo conector, como pode ser visto na Figura 4.5.



Figura 4.5 – Cabeçote orbital com o mangote instalado

A instalação do sensor de HOME no interior do cabeçote orbital se fez necessária para permitir que a unidade de controle pudesse referenciar o conjunto cinemático (encontrar a posição zero do sistema) e assim posicionar corretamente a

engrenagem que transporta o eletrodo de tungstênio no entorno dos tubos. De início foi cogitado o emprego de um sensor do tipo óptico, semelhante ao que é utilizado no sensor de velocidade de arame do MVA (27). Entretanto, por este ser instalado num ambiente confinado, exposto a elevados níveis de temperatura e principalmente de luminosidade provenientes do arco, optou-se pela instalação de um sensor mecânico do tipo chave fim de curso.

Depois de devidamente instalado junto à unidade de controle, foram realizados ensaios de acionamento do cabeçote orbital com o intuito de validar a montagem. Entretanto, constatou-se que o deslocamento realizado pela engrenagem principal não estava de acordo com o previsto pela unidade de controle. Inicialmente, imaginou-se que se tratava de algum erro devido ao acionamento elétrico do motor. No entanto, foi constatada a existência de uma folga no acoplamento entre o eixo do motor e o conjunto cinemático do cabeçote orbital.

A identificação desta folga não havia ocorrido anteriormente, haja vista que até então o cabeçote orbital não tinha sido acionado por uma unidade de controle capaz de controlar o valor do seu deslocamento. Este problema foi resolvido com a confecção de uma chaveta apropriada e o cabeçote orbital passou a operar de forma adequada.

4.4 Fonte de soldagem

Tendo em vista que os sistemas de soldagem orbital TIG são destinados a operações de montagem e/ou manutenção, torna-se evidente a necessidade destes sistemas serem portáteis. Desta forma, para atender aos requisitos de portabilidade exigido por este tipo de equipamento, adotou-se a fonte de soldagem Larry Flex (28). Esta fonte de soldagem emprega tecnologia inversora, nome devido à estrutura eletrônica de potência utilizada neste tipo de equipamento, que converte a energia de baixa frequência da rede elétrica em energia com alta frequência de oscilação, o que permite a drástica redução da massa e do volume do transformador inerente a todo equipamento de soldagem. A Tabela 4.1 mostra as características desta fonte.

Tabela 4.1 – Características da Fonte de Soldagem Larry Flex

Tipo de corrente	contínua	
Faixa de Corrente	TIG	(7 a 160 A)
	MIG/MAG e ER	(7 a 140 A)
Fator de Trabalho A 30 °C	TIG	160 A / 16V: 30% 110 A / 14V: 100%
	MIG/MAG e ER	140 A / 26V: 30% 110 A / 24V: 100%
Corrente de Alimentação	26 A para 140 A / 26 V	
Tensão de Alimentação	220 V monofásico	
Dimensões (LxAxP)	(190x250x390) mm	
Peso	10 kg	

O controle da fonte de soldagem foi realizado por intermédio de uma interface já existente no equipamento. Entretanto, além dos sinais já existentes nesta interface (sinal analógico de referência da corrente, de disparo da solda e sinal de tensão do arco), foi necessário implementar o sinal de controle do gás e o sinal de controle de acionamento da alta freqüência.

O sinal de controle do gás foi implementado devido à necessidade de ajuste dos tempos de pré-gás e pós-gás, uma vez que na versão original deste equipamento, estes tempos são pré-definidos de fábrica, não sendo possível alterá-los.

Já a implementação do sinal de controle de acionamento da alta freqüência fez-se necessária em virtude do modo no qual a fonte de soldagem aciona a mesma. Originalmente, a fonte de soldagem habilita a alta freqüência após o disparo da solda e, a partir do momento que a tensão de saída da máquina for maior que um dado valor de referência, a alta freqüência é acionada automaticamente. Todavia, como pode ser observado na Figura 2.2, que representa a característica estática do arco TIG, a utilização de níveis de corrente extremamente baixos (<10 A) resulta numa maior tensão de arco (isto é mais pronunciado na soldagem com gás Hélio) suficiente para que a alta freqüência seja acionada mesmo durante a soldagem. A constante ativação da alta freqüência não acarreta problemas à solda. Entretanto, como forma de reduzir a quantidade de ruídos gerados por esta, optou-se por

colocar este sinal de controle de acionamento da alta frequência para garantir que a mesma seja acionada somente durante a abertura do arco.

4.5 IHM de comando remoto

Neste sistema de soldagem orbital foi empregada a mesma IHM de comando remoto utilizado pelo Tartílope V1 (29). Esta é munida de um microcontrolador (componente que agrega um pequeno sistema microprocessado) responsável por realizar a varredura das teclas, controlar o mostrador de LCD e realizar a comunicação serial (RS-232) com a placa microcontrolada. O mostrador de LCD é alfanumérico e composto de duas linhas e quarenta colunas.

Durante a realização de ensaios de solda preliminares, IHM se mostrou bastante suscetível às interferências geradas pela abertura do arco com alta frequência. Por isso, para viabilizar o seu uso foi necessário torná-lo mais robusto quanto a estas interferências. O primeiro passo foi à instalação de filtros capacitivos junto à alimentação do circuito e, em seguida, foi realizada a conexão elétrica do gabinete e da blindagem do cabo do teclado de comando remoto à malha de isolamento. Com essas medidas, conseguiu-se sanar os efeitos inerentes da alta frequência sobre este componente do sistema.

4.6 Controle da velocidade de deslocamento do eletrodo

Para que ocorra o acionamento do conjunto cinemático é necessária a presença de pulsos na entrada do servo driver. A cada pulso, a engrenagem que transporta o eletrodo de tungstênio desloca-se por um valor correspondente (este valor é dependente da relação de engrenagens do conjunto cinemático e dos parâmetros regulados no P.I.D. do servo driver). Assim, a velocidade de deslocamento do eletrodo é determinada pela frequência desses pulsos. Para tanto, faz-se necessário a utilização de uma rotina que gere pulsos em intervalos de tempo bem definidos para que se possa obter o acionamento do conjunto cinemático com velocidade confiável.

Para essa função utilizou-se o timer 0 do sistema correspondente ao CTRB. Este constitui-se num tipo de interrupção que, uma vez acionada, faz com que o software

de controle pare momentaneamente o processamento do programa principal e execute a rotina de interrupção (Figura 4.6).

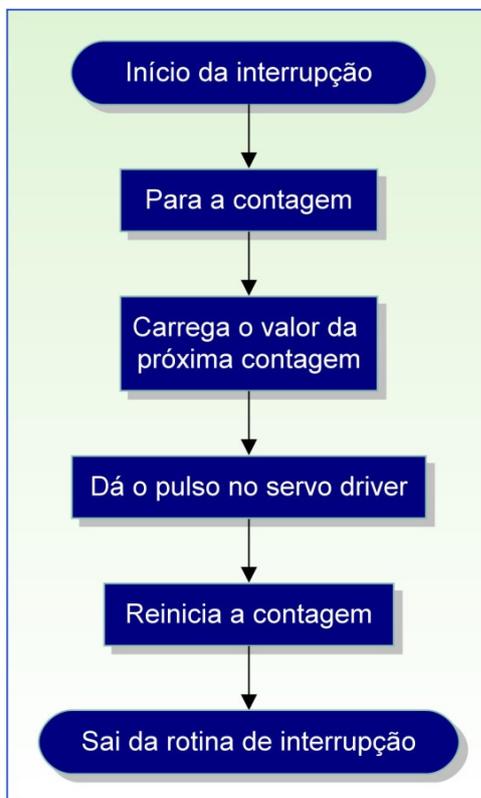


Figura 4.6 – Rotina de interrupção que define a velocidade do motor

O seu funcionamento consiste na contagem de um valor previamente programado e quando esta contagem termina, a rotina de interrupção é acionada. Ao entrar nesta rotina de interrupção, a contagem é parada e o valor da próxima contagem é carregado no timer. Em seguida um pulso é dado no servo driver do motor e a contagem é reiniciada. Considerando que o tempo de duração de cada contagem é fixo e determinado pelo período do clock do processador, pode-se controlar a velocidade de deslocamento do eletrodo por meio do número de contagens que a interrupção realiza. O controle da interrupção é realizado por um “flag” chamado TR0, no qual pode-se parar ou reinicializar a contagem a qualquer momento.

Para tornar possível a regulação da velocidade de deslocamento do eletrodo, fez-se necessário implementar no software de controle uma função de transferência

que relacionasse a velocidade de soldagem regulada pelo usuário e o número de contagens que deve ser carregado no timer.

A velocidade de soldagem regulada pelo usuário refere-se à velocidade linear de deslocamento do eletrodo no perímetro do tubo. Porém, tendo em vista que no cabeçote orbital o tipo de movimento é angular, faz-se necessário conhecer o diâmetro do tubo para que seja possível o cálculo da velocidade angular correspondente à velocidade regulada pelo usuário. Desta forma, além de relacionar a velocidade com o número de contagens, esta função deve promover a conversão entre as velocidades (angular e linear) para um dado diâmetro do tubo.

O deslocamento linear realizado pelo eletrodo ao completar uma volta é dado pela Equação 4.1.

$$X = \pi D \quad \text{Equação 4.1}$$

Já o tempo gasto para completar uma volta é dado pela Equação 4.2.

$$t = 15800 \cdot 1,085 \times 10^{-6} \cdot NC \quad \text{Equação 4.2}$$

Nesta equação, 15800 é a quantidade de pulsos fornecidos ao driver para que o eletrodo realize uma volta completa, $1,085 \times 10^{-6} s$ é o tempo gasto em cada contagem e NC o número de contagem que deve ser carregado no timer.

Substituindo a Equação 4.1 e a Equação 4.2 na equação da velocidade, têm-se a Equação 4.3.

$$V = \frac{\pi D}{15800 \cdot 1,085 \times 10^{-6} \cdot NC} \quad \text{Equação 4.3}$$

Resolvendo a Equação 4.3 para NC e realizando as devidas conversões de unidades para que a velocidade de soldagem seja dada em cm/min , têm-se a Equação 4.4.

$$NC = \frac{10995 \cdot D}{V} \quad \text{Equação 4.4}$$

Resolvendo esta equação têm-se o valor da contagem que deve ser carregado no timer para uma dada velocidade de soldagem regulada pelo usuário e o diâmetro dos tubos a serem soldados. Entretanto, a contagem do timer ocorre de forma incremental e termina quando a mesma atinge 65535. Assim o valor que deve ser carregado no timer é descrito pela Equação 4.5.

$$VNC = \left(65535 - \frac{10995 \cdot D}{V} \right) \quad \text{Equação 4.5}$$

4.7 Funções de controle

O software de controle do sistema de soldagem orbital foi desenvolvido em linguagem de programação C e o compilador utilizado foi o Proview32 da empresa Franklin.

Na Figura 4.7 é mostrado o fluxograma do corpo principal do software de controle do sistema de soldagem orbital, onde é possível visualizar as principais funções e menus do equipamento.

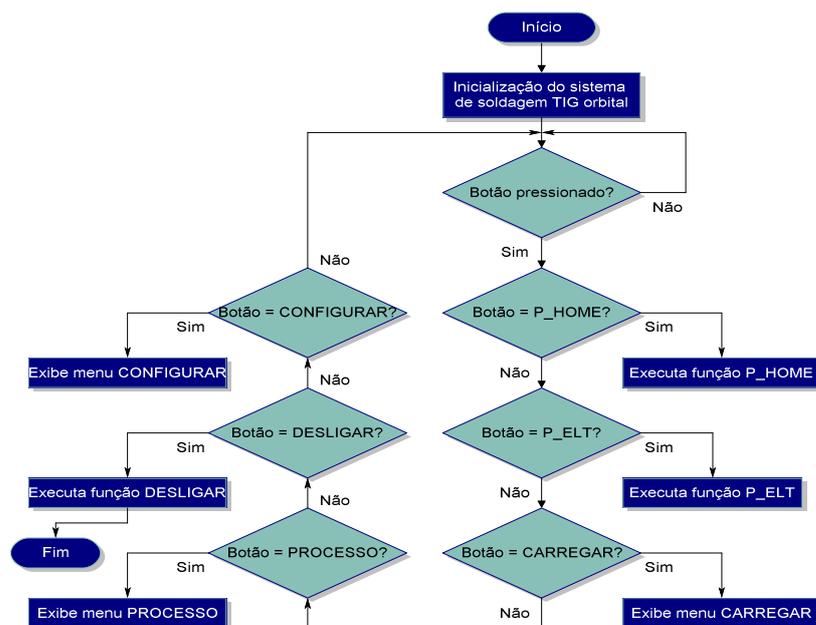


Figura 4.7 – Fluxograma do programa principal de controle do sistema de soldagem orbital

Como pode ser observado, primeiramente o software realiza a inicialização do sistema de soldagem orbital. Esta operação consiste na recuperação dos dados armazenados na última vez que o equipamento foi utilizado, inicialização das interrupções, assim como configuração da comunicação serial entre a unidade de controle e o teclado de comando remoto. Em seguida, o software exibe ao usuário a tela principal do programa (Figura 4.8) e entra numa rotina de verificação das teclas para saber qual função deve ser executada.



Figura 4.8 – Tela principal do programa

4.7.1 Função P_HOME

Ao ser selecionada a opção P_HOME, o software de controle aciona a interrupção do motor e passa a verificar o estado do sensor de HOME. No momento em que o sensor de HOME é ativado, a interrupção é desligada, pois significa que a engrenagem que transporta o eletrodo de tungstênio atingiu a posição de zero do sistema (Posição HOME). Nesta posição, a abertura da engrenagem principal é coincidente com a abertura existente no corpo do cabeçote orbital, tornando possível a entrada, e principalmente a saída dos tubos do interior do mesmo.

Além de disponível ao usuário, através do teclado de comando remoto, esta função é chamada toda vez que o processo de soldagem é disparado. Isto se faz necessário para referenciar o sistema e, assim, garantir a correta posição do eletrodo de tungstênio ao longo do perímetro do tubo. Já no fim do processo de soldagem, esta função é chamada para posicionar a abertura da engrenagem

principal de forma a permitir a retirada dos tubos soldados, conforme mostra a Figura 4.9.

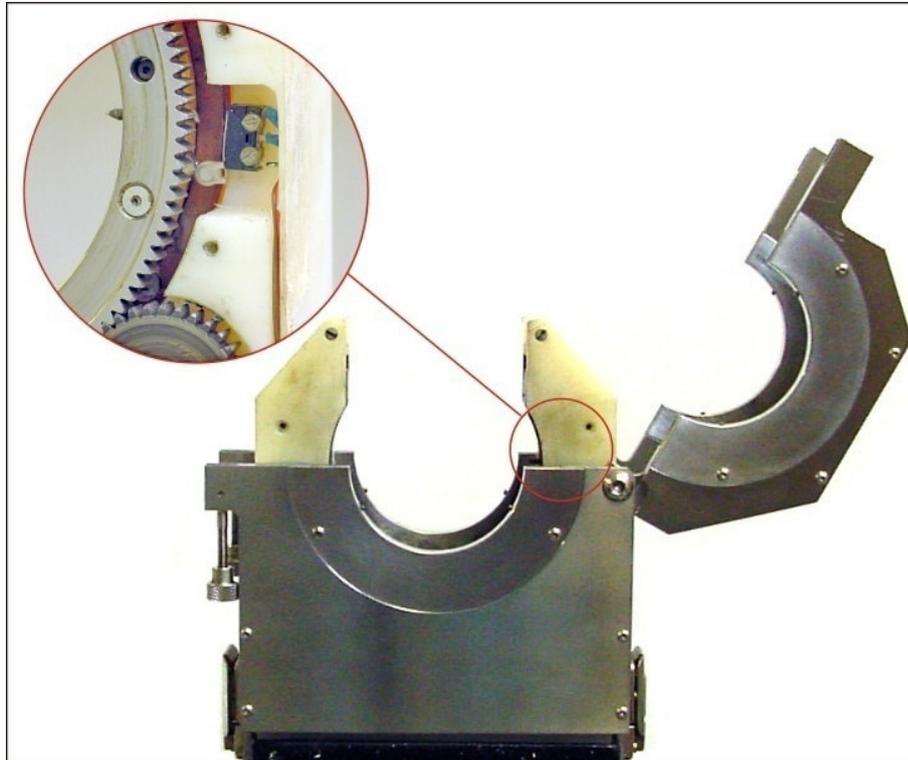


Figura 4.9 – Cabeçote orbital na posição de HOME e detalhe do sensor

4.7.2 Função P_ELT

A engrenagem principal incorpora um sistema de fixação do eletrodo de tungstênio composto por um orifício, na direção radial da engrenagem, e um parafuso transversal. Para instalar o eletrodo, basta introduzi-lo no orifício e depois dar o aperto no parafuso para fixação do mesmo. Entretanto, devido ao fato do cabeçote orbital ser de câmara fechada, a instalação do eletrodo é possível quando a engrenagem principal encontra-se posicionada de forma que se tenha acesso ao sistema de fixação do eletrodo.

Para permitir o correto posicionamento da engrenagem principal no que tange a instalação do eletrodo, foi implementada a função P_ELT. Ao ser selecionada esta função, o software de controle aciona a interrupção do motor e passa a verificar o estado do sensor de HOME. No momento em que este sensor é ativado, ou seja, quando a engrenagem principal encontra a posição de HOME, esta se desloca por

uma distância adicional equivalente a 3950 pulsos e desliga a interrupção. Nesta posição, o sistema de fixação do eletrodo encontra-se localizado exatamente no meio da abertura no cabeçote orbital, conforme mostra a Figura 4.10.

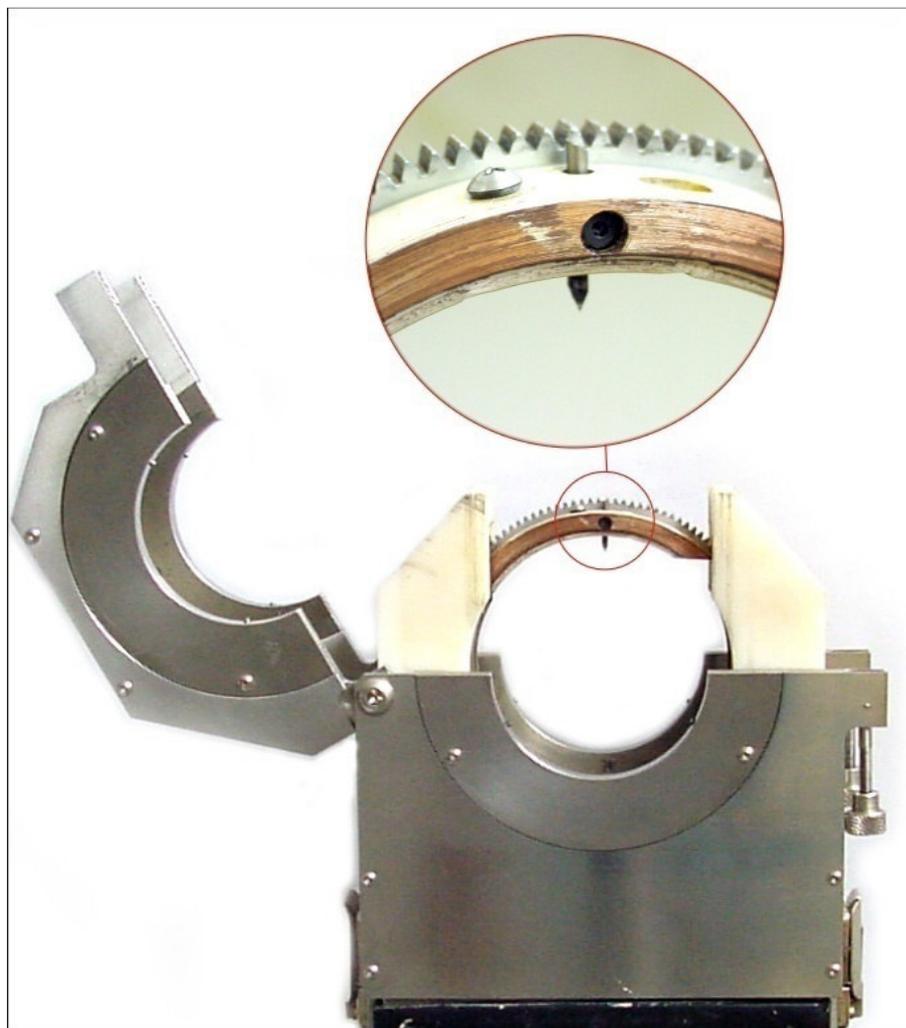


Figura 4.10 – Cabeçote orbital posicionado para a troca do eletrodo. Detalhe do sistema de fixação do eletrodo

4.7.3 Menu CARREGAR

Ao se pressionar a tecla CARREGAR, o teclado de comando remoto exibe um menu com os programas de soldagem previamente salvos (Figura 4.11).

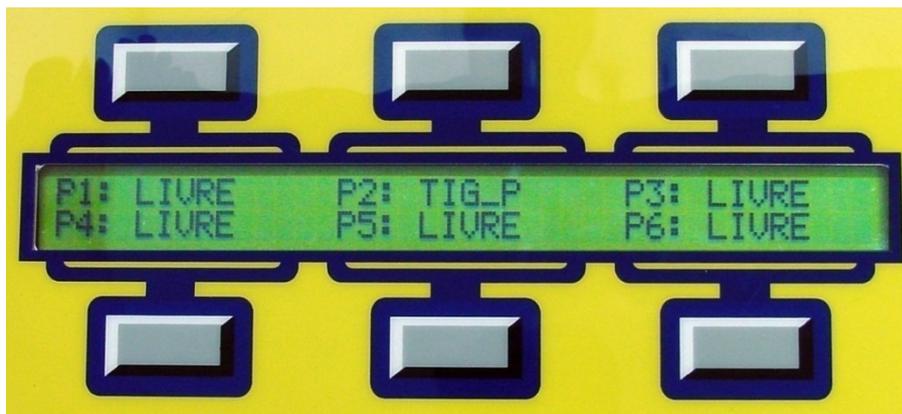


Figura 4.11 – Menu CARREGAR

Foi concebido no software uma capacidade de memória de seis programas de soldagem. Para recuperar um programa, basta pressionar a tecla correspondente e o software de controle automaticamente recupera da memória o programa desejado e exibe o menu com a opção habilitar solda. Quando uma posição de memória está vazia, aparece no campo correspondente à palavra LIVRE.

A implementação desta função torna a operação do equipamento mais dinâmica se for considerado o número de variáveis envolvidas no processo de soldagem orbital TIG e o tempo gasto para regulá-las no equipamento.

4.7.4 Menu CONFIGURAR

Na tela principal do equipamento (Figura 4.8) há a opção CONFIGURAR, cuja tecla correspondente faz aparecer o menu da Figura 4.12.

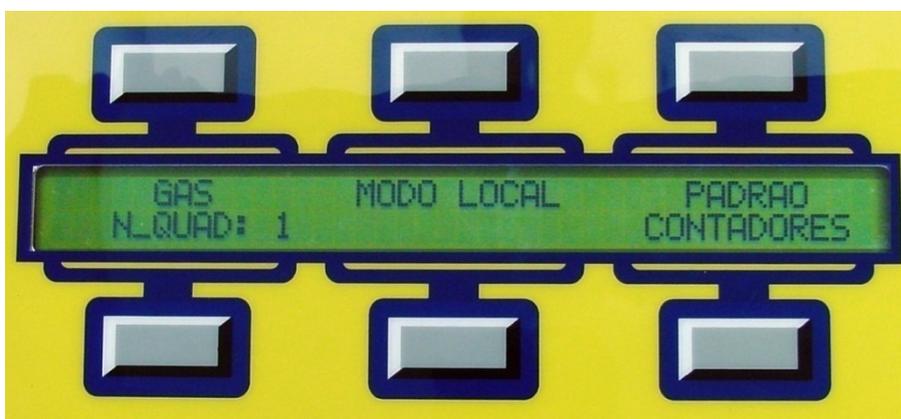


Figura 4.12 – Menu CONFIGURAR

A função N_QUAD foi desenvolvida com o intuito de tornar o equipamento extremamente flexível para o desenvolvimento de procedimentos de soldagem. Esta possibilita que o tubo seja soldado com o mesmo conjunto de variáveis durante todo o seu perímetro (N_QUAD = 1) ou dividido em quatro seções correspondentes às posições de soldagem plana, vertical ascendente, vertical descendente e sobre-cabeça (Figura 4.13). Para cada seção, um conjunto de variáveis pode ser definido, possibilitando que no transcurso orbital do eletrodo, cada um desses conjuntos atue no setor correspondente, mediante monitoramento contínuo da posição de soldagem.

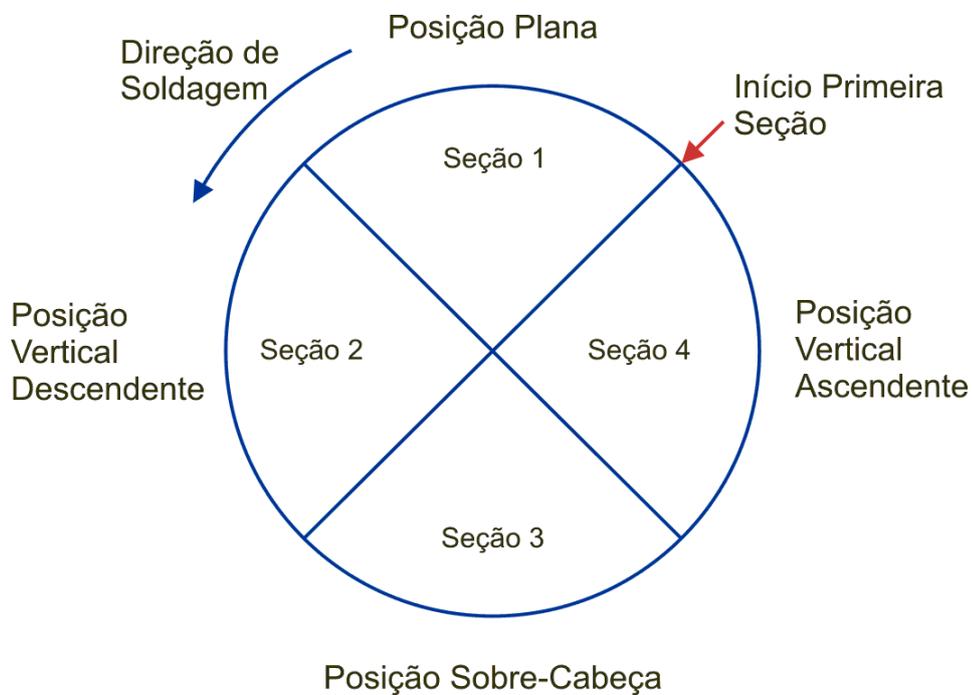


Figura 4.13 - Divisão do tubo em 4 seções e suas respectivas posições de soldagem

Fazendo uso desta função, torna-se possível confrontar as várias afirmações existentes na literatura. O Welding Handbook da AWS (12), por exemplo, cita que com corrente pulsada não é necessário a alteração do conjunto de variáveis para atender a todas as posições de soldagem, que se obtém em um tubo posicionado com o eixo na horizontal. Já outras literaturas, principalmente dos fabricantes de equipamentos orbitais (30), anunciam a necessidade de se ter no mínimo quatro conjuntos de variáveis para atender as várias posições de soldagem.

Na opção GAS têm-se a configuração dos tempos de pré-gás e pós-gás, assim como a função TESTE GAS, que permite o acionamento do gás sem que a solda seja habilitada. No menu CONTADORES é disponibilizado ao usuário o tempo de uso do equipamento e a parcela desse tempo que o mesmo permaneceu soldando. Já a função PADRAO, quando acionada, retorna os valores de todas as variáveis do equipamento para os valores definidos como padrão.

4.7.5 Menu PROCESSO

Selecionando a opção PROCESSO, o menu correspondente é apresentado, conforme mostra a Figura 4.14.



Figura 4.14 – Menu do processo de soldagem

Neste, é realizada a seleção das variáveis de soldagem por intermédio da opção VARIÁVEIS, que uma vez selecionada, apresenta um novo menu com quatro opções correspondentes a cada seção de soldagem. Depois de selecionada a seção de interesse, um menu com as variáveis corrente de pulso, tempo de pulso, corrente de base, tempo de base, velocidade de soldagem durante a fase de pulso e velocidade de soldagem durante a fase de base é exibido ao usuário. A implementação de velocidades de soldagem distintas, e sincronizadas com a pulsação da corrente, não provém de necessidades identificadas previamente, mas da possibilidade de permitir ao equipamento a máxima flexibilidade no desenvolvimento de procedimentos. Caso o procedimento de soldagem contemple

apenas uma seção, ou seja, realize a soldagem de todo o perímetro do tubo com o mesmo conjunto de variáveis, serão utilizadas as variáveis constantes na seção 1.

A configuração do diâmetro dos tubos a serem soldados, bem como a da sobreposição que o eletrodo deve realizar ao final da solda para promover o correto fechamento do cordão é realizado na opção CONFIGURAR. O valor da sobreposição regulado pelo usuário refere-se ao deslocamento linear do eletrodo no perímetro dos tubos. Entretanto, devido o tipo de movimento ser angular, para um mesmo valor de sobreposição regulado têm-se diferentes deslocamentos reais do eletrodo de acordo com o diâmetro dos tubos. Desta forma, foi implementado no software de controle uma equação que relaciona a quantidade de pulsos (XP) a ser dada no servo driver do motor com a sobreposição regulada pelo usuário (SP) e o diâmetro (D) dos tubos a serem soldados (Equação 4.6).

$$XP = \frac{15800 \cdot SP}{\pi D} \qquad \text{Equação 4.6}$$

Na soldagem realizada pelo sistema orbital TIG existe a possibilidade (mesmo que remota) de ocorrência de curtos-circuitos entre o eletrodo de tungstênio e os tubos. Na maioria dos casos, isto é decorrente da má instalação do tubo no interior do cabeçote orbital. Desta forma, no menu CONFIGURAR encontra-se a opção de corrente de curto-circuito e tensão de curto circuito, que devidamente regulados mantêm a integridade do eletrodo (este segue a mesma filosofia de atuação do “lift arc”). Além disso, foi implementado também neste menu a regulagem do tempo de rampa de subida, e tempo de rampa de descida da corrente, corrente de finalização e tempo de finalização, para permitir total flexibilidade na elaboração dos procedimentos de soldagem.

Pressionando-se a tecla correspondente à opção SALVAR, todas as variáveis do processo são salvas na posição de memória desejada pelo usuário, para posteriormente serem resgatadas por meio do menu CARREGAR.

Ao ser acionada a opção HAB. SOLDA, a mensagem “Aguardando disparo” é exibida”. Ao ser disparado o processo, o software de controle posiciona o eletrodo de tungstênio no início da primeira seção, para somente depois dar início a abertura do arco por intermédio do acionamento da alta freqüência. Uma vez estabelecido o arco entre o eletrodo e a peça, o eletrodo é deslocado até a posição final da primeira

seção, com o conjunto de variáveis regulados pelo usuário. Chegando na posição final da primeira seção, o conjunto de variáveis é trocado automaticamente pelo software de controle para os valores correspondentes ao da seção seguinte, sendo a seção incrementada. Este processo se repete até que o eletrodo atinja a posição final da última seção. Ao atingi-la, o eletrodo é deslocado por um valor definido pelo usuário para fazer a sobreposição, garantindo assim, o correto fechamento do cordão. Depois de realizada a sobreposição, o arco é extinto e o cabeçote orbital é posicionado de forma a permitir a retirada do tubo (posição de HOME). Durante a soldagem, o software de controle verifica constantemente a tensão do arco. Se esta ultrapassa o limite inferior do valor da tensão de curto circuito regulada, o software de controle comanda a corrente de curto circuito. Normalmente a corrente de curto circuito deve ser a mais baixa possível para manter a integridade do eletrodo. A Figura 4.15 mostra o fluxograma de controle do processo de soldagem do cabeçote orbital.

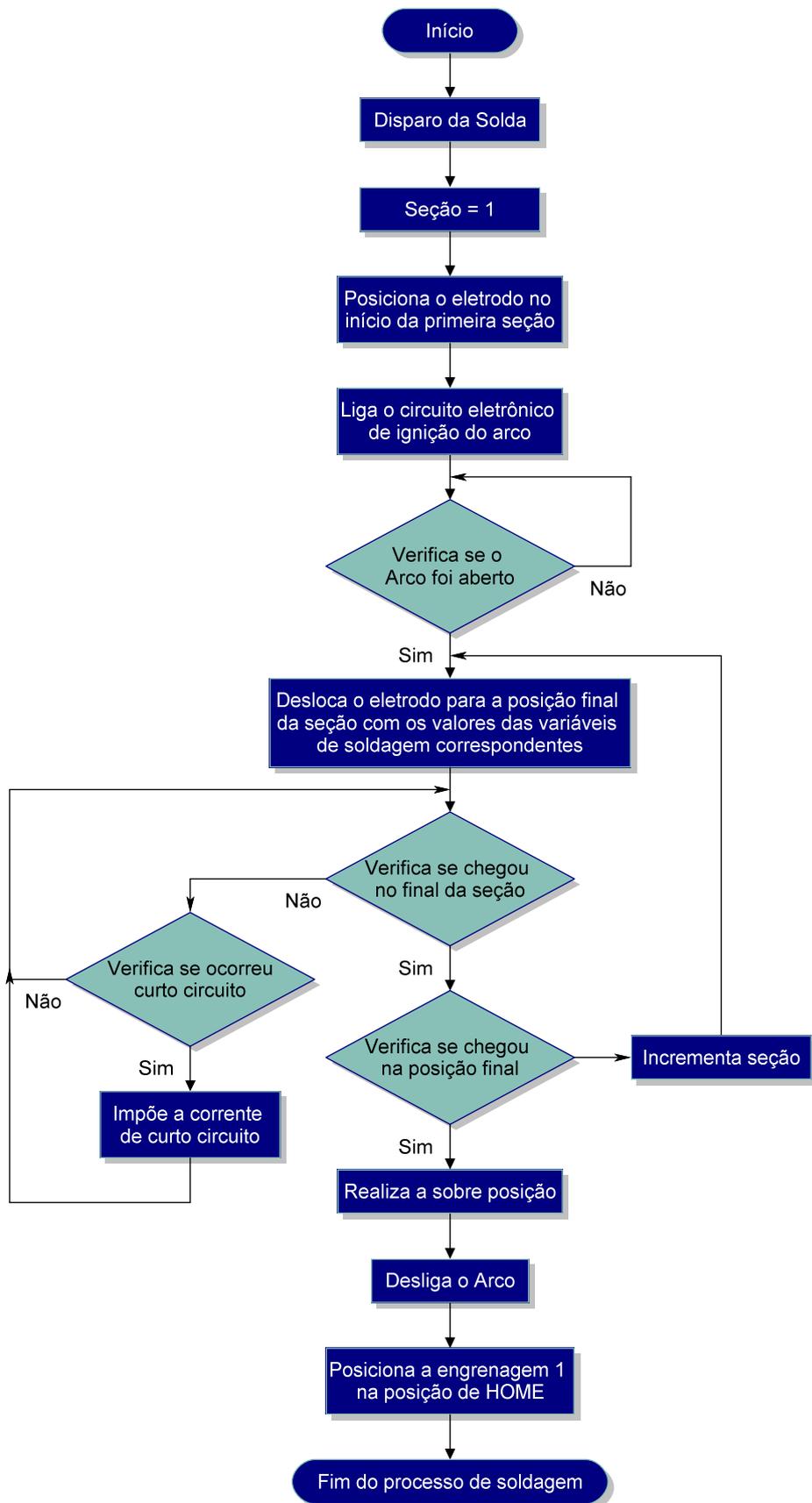


Figura 4.15 - Fluxograma de controle do processo de soldagem

4.7.6 Função DESLIGAR

Quando esta função é acionada, o software de controle realiza o procedimento de desligamento do equipamento. Este procedimento consiste em salvar na memória todos os dados da operação atual, para que na próxima vez que o equipamento seja utilizado, os mesmos possam ser carregados. Adicionalmente, é salvo uma variável com o valor hexadecimal 0XAA. O valor desta variável é verificado toda vez que o equipamento é ligado e em seguida alterado para 0XFF. Assim, caso o equipamento não seja desligado corretamente pelo teclado de comando remoto, esta variável permanecerá com o valor 0XFF e na próxima vez que o mesmo for ligado aparecerá uma mensagem dizendo que o equipamento não foi desligado corretamente e que devido a isto os valores padrão serão carregados.

4.8 Avaliação de desempenho do sistema de soldagem orbital

No texto a seguir são descritos os procedimentos utilizados para a verificação de desempenho do sistema de soldagem orbital TIG desenvolvido. Esta verificação baseou-se na aferição da corrente de soldagem, da velocidade de deslocamento do eletrodo e por fim na realização de soldas utilizando corrente contínua constante. Para a aquisição das variáveis de soldagem foi utilizado o SAP (31), um equipamento de aquisição de dados desenvolvido pelo próprio LABSOLDA.

4.8.1 Corrente de soldagem

Para manter a integridade do sistema de aquisição, o sensor de corrente foi conectado ao equipamento somente após a abertura do arco, tendo em vista os efeitos nocivos inerentes a abertura do arco com alta frequência e os danos que isto pode causar. A aquisição da corrente de soldagem foi realizada em corrente pulsada para permitir a avaliação da amplitude da corrente e dos tempos envolvidos na pulsação da mesma. Os valores da corrente de pulso e de base foram regulados, respectivamente, em 100 A e 50 A e os tempos de pulso e de base em 0,3 s. Estes valores foram arbitrados de forma que a corrente média coincidissem com o valor correspondente a metade da faixa de operação do equipamento, uma vez que

normalmente a calibração dos equipamentos é realizada no meio da sua faixa de operação.

A Figura 4.16 mostra o gráfico da corrente aqisitada durante o regime.

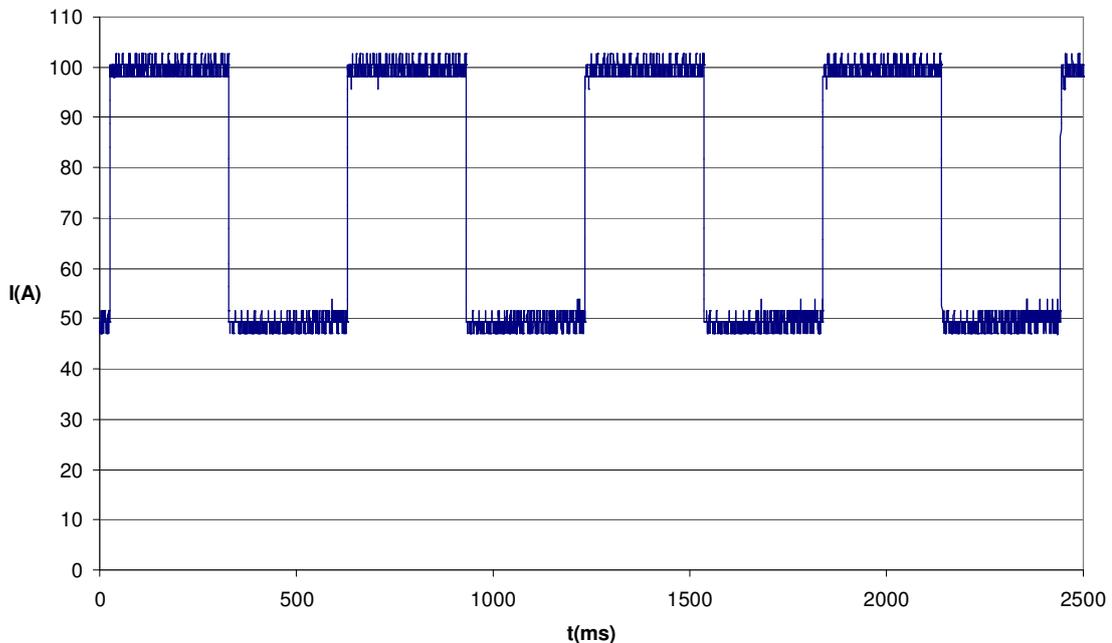


Figura 4.16 – Forma de onda da corrente aqisitada

A aquisição forneceu uma corrente média no pulso de 99 A, uma corrente média na base de 48 A e tempos de pulso e de base de 300 ms. O termo corrente média de pulso e de base é apropriado devido a oscilação da corrente (ripple). Este “ripple” é próprio dos equipamentos de soldagem que utilizam transistores operando na região de corte e saturação para realizar o controle da corrente. No caso da fonte de soldagem empregada no sistema de soldagem orbital, este “ripple” possui uma amplitude da ordem de 5 A.

Do ponto de vista da corrente de soldagem, o desempenho do equipamento se mostrou bastante satisfatório, pois, tomando o sistema de aquisição como padrão, verificou-se que a corrente real de soldagem e os tempos de pulsação da mesma apresentaram erros dentro dos limites aceitáveis (na ordem de 5%).

4.8.2 Velocidade de deslocamento

Para aquisição da velocidade de soldagem foi utilizado um sensor de velocidade de arame com resolução de 500 pulsos acoplado, por intermédio de um disco, a engrenagem principal do cabeçote orbital. Este sensor foi conectado ao canal de leitura da velocidade de arame do SAP (Figura 4.17).

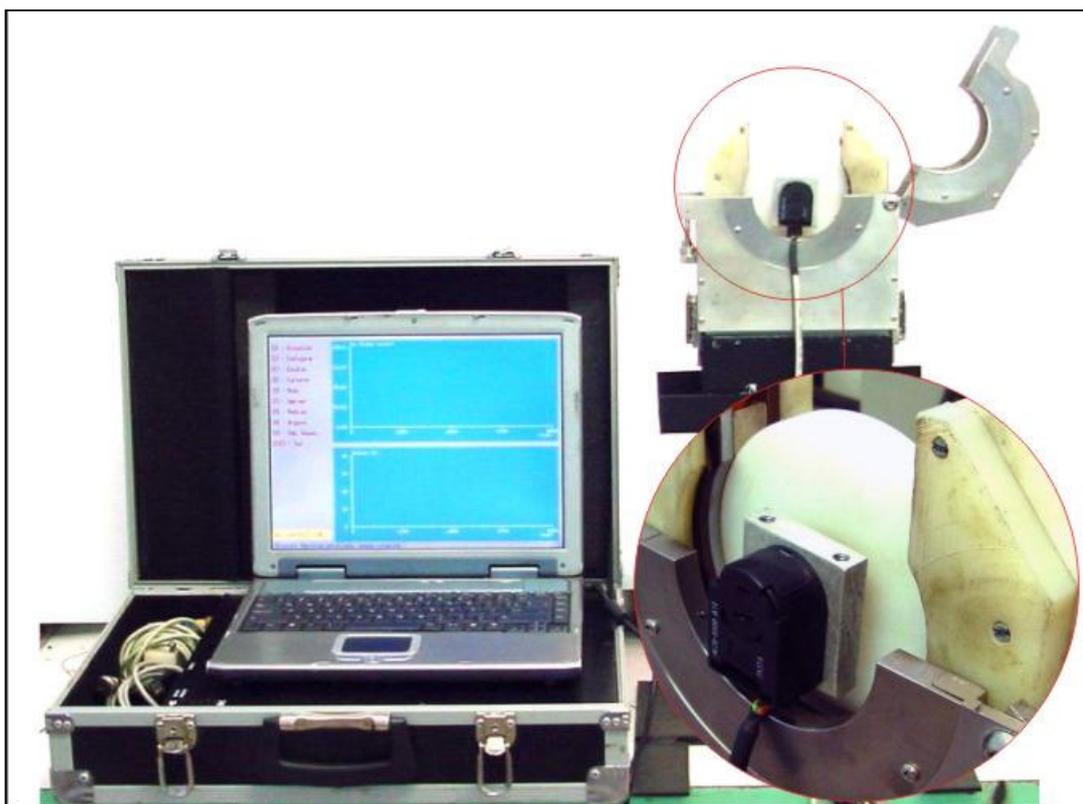


Figura 4.17 – Estrutura montada para aquisição da velocidade de deslocamento do cabeçote orbital

Considerando que o SAP já opera com este sensor e o mesmo já se encontra devidamente calibrado, fez-se somente necessário a adequação do coeficiente angular de calibração, para que o valor mostrado na tela do programa correspondesse diretamente a real velocidade de deslocamento, já que a velocidade de soldagem do cabeçote é dada em cm/min e a velocidade de arame medida pelo SAP em m/min.

Os valores de velocidade de pulso e de base foram regulados, respectivamente, em 16,6 mm/s (100 cm/min) e 8,3 mm/s (50 cm/min) e os tempos de pulso e de base

em 0,5 s. Como diâmetro do tubo admitiu-se 22,5 mm, que corresponde ao diâmetro do disco do sensor, já que a velocidade linear medida pelo SAP é realizada com base nessa medida.

Na Figura 4.18 é apresentada o gráfico com a aquisição realizada.

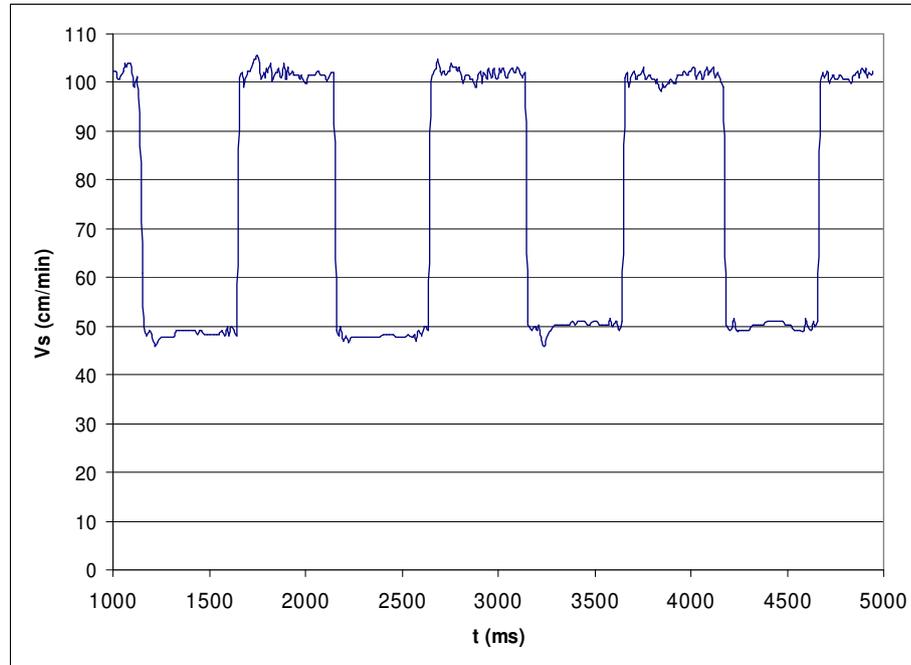


Figura 4.18 – Forma de onda da velocidade adquirida

A aquisição forneceu uma velocidade média no pulso de 17 mm/s (102 cm/min), na base de 8,3 mm/s (50 cm/min) e tempos de pulso e de base cerca de 500 ms, correspondendo com o que foi regulado. Com relação à dinâmica de resposta do equipamento, a mesma se mostrou bastante satisfatória, mostrando que os parâmetros do compensador P.I.D., citado no item 3.5 estão adequados.

4.8.3 Soldagem com corrente constante

Uma vez aferida a corrente de soldagem e a velocidade de deslocamento do eletrodo, foram realizadas soldas de união de tubos, com 76,2 mm de diâmetro e 1,2 mm de espessura de parede, utilizando corrente contínua constante. Estas soldas foram realizadas com corrente de 36 A e velocidade de soldagem de 2 mm/s (12 cm/min). Este valor de corrente foi adotado a partir da relação comumente aceita

para a soldagem de chapas finas de aço inox, no qual indica uma corrente de 30 A para cada milímetro de espessura da chapa. Já a velocidade de soldagem foi determinada de forma que resultasse numa raiz cuja largura apresentasse cerca de 2 mm. A Figura 4.19 mostra a região entre as posições correspondentes a 6 e 9 horas, onde pode ser visto o aspecto final desta solda.

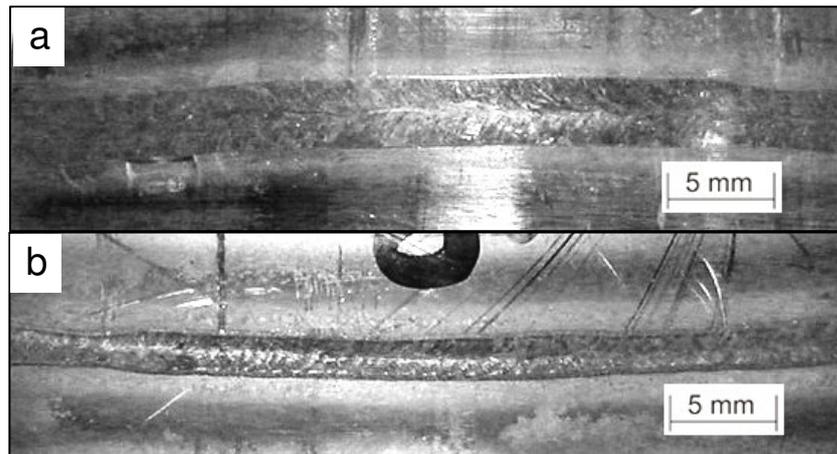


Figura 4.19 – Solda de união de tubos com corrente contínua constante, em (a) face e em (b) raiz da solda. Parâmetros: I: 36 A e Vs: 2 mm/s (12 cm/min).

A Figura 4.20 mostra a seção transversal da solda para as principais posições de soldagem, com o tubo soldado na posição horizontal (junta de todo sem folga), no qual se pode avaliar o comportamento do cordão ao longo de todo o perímetro do tubo.

Como se pode observar a solda se apresentou adequada no que diz respeito à continuidade da raiz e variações dimensionais da poça de fusão ao longo do perímetro do tubo. Embora nas posições plana e vertical descendente existir forte desalinhamento entre os tubos devido a problemas de ovalização, o equipamento se mostrou capaz de realizar um cordão de solda adequado e livre de defeitos. Esta falta de alinhamento entre os tubos é resultante da deformação ocasionada pelo processo de corte dos corpos de prova. Este reaproveitamento foi necessário em virtude do número reduzido de corpos de prova que se dispunha para a elaboração deste trabalho.

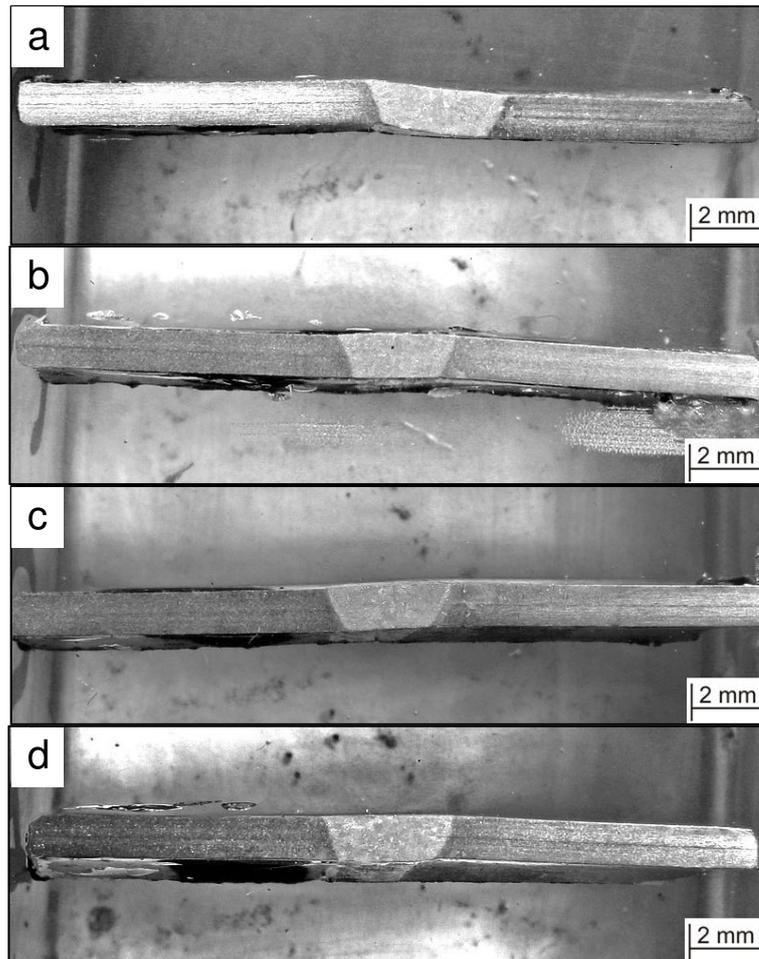


Figura 4.20 – Seção transversal da solda com corrente constante: (a) posição plana, (b) vertical descendente, (c) sobre-cabeça e (d) vertical ascendente.

Apesar de terem sido apresentados resultados satisfatórios com corrente constante, é conhecido da literatura (11)(12) a utilização da técnica da corrente pulsada no que tange a sustentação da poça de fusão fora da posição plana. Diferentemente da soldagem com corrente constante, onde se têm somente duas variáveis, corrente e velocidade de soldagem, na soldagem TIG pulsada têm-se uma forma de onda composta por diferentes variáveis (I_p , t_p , I_b , t_b e V_s) que se relacionam entre si. Isto indica a necessidade de desenvolvimento de uma metodologia que promova o entendimento de como estas variáveis se relacionam, e assim, auxilie na determinação das mesmas resultando em parâmetros adequados a soldagem.

CAPITULO 5

METODOLOGIA PARA A DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM ORBITAL DE TUBOS PELO PROCESSO TIG PULSADO

5.1 Desenvolvimento de metodologia para a determinação de parâmetros na soldagem TIG pulsada

Na soldagem de união de tubos, é praticamente impossível fazer uma avaliação visual da qualidade da raiz sem o uso de equipamentos específicos como o boroscópio (semelhantes ao endoscópio, freqüentemente utilizado em medicina), devido ao acesso restrito inerente a geometria e dimensões dos tubos. Outros meios de avaliar a sanidade da solda consistem na utilização do ultra-som ou raios-x em casos específicos. Além disso, nesta operação de soldagem, os procedimentos de preparação da junta, como o corte e a limpeza dos tubos, são extremamente determinantes para o sucesso da operação.

Baseado nisso, torna-se necessário o desenvolvimento de uma metodologia para a determinação dos parâmetros de soldagem, constituindo procedimentos robusto, capazes de realizar soldas com elevado grau de confiança, em termos de qualidade e, principalmente, de repetitividade. Pois, uma vez constatado a ocorrência de falhas no cordão de solda, a mesma é rejeitada e toda operação tem de ser refeita, exigindo novos procedimentos de preparação da junta e de inspeção, agregando custo a operação.

No presente trabalho as atenções estão focadas na raiz da solda, onde se deseja obter a consistência necessária para viabilizar a qualificação do procedimento de soldagem. Para tanto, o ponto de partida da metodologia consiste na realização de um único ponto de solda, cuja largura na face oposta da chapa, o que será denominado como raiz, tenha a mesma largura desejada na raiz do cordão a ser realizado.

O tempo de duração deste ponto corresponderá ao tempo de pulso, e como neste trabalho será utilizada uma razão cíclica de 50 %, ou seja, tempo de pulso igual ao tempo de base, têm-se com isso determinado o período de pulsação da corrente. Já a corrente de base será arbitrada, cujo valor deve ser suficientemente baixo apenas para manter o arco aberto, e tornar o seu efeito térmico o menos

significativo possível, a fim de tornar, nesta fase, o processo de solidificação mais eficiente possível.

Uma vez encontrada a condição de interesse, ou seja, um ponto que apresentou a largura da raiz desejada para o cordão, a próxima etapa será medir o diâmetro L do ponto (na raiz) e a partir do período de pulsação da corrente e da sobreposição desejada, calcular a velocidade de soldagem V_s .

5.1.1 Determinação da velocidade de soldagem

No processo TIG pulsado uma adequada geometria do cordão é resultante da concatenação de todas as variáveis do processo. Assim, o efeito da velocidade de soldagem deve ser considerado, pois a uma dada frequência de pulsação da corrente, uma velocidade de soldagem relativamente baixa resultará numa sobreposição muito grande entre os pontos de solda, gerando um aporte de calor excessivo, suficiente para que a poça de fusão escorra. Já uma velocidade de soldagem extremamente alta resultará em pontos de solda sem qualquer sobreposição, apresentando falta de continuidade do cordão.

Estas considerações evidenciam a importância da sobreposição entre os pontos na determinação da velocidade. Desta forma, foi criado um equacionamento matemático com o intuito de determinar a velocidade de soldagem a partir do período de pulsação da corrente, da sobreposição desejada entre os pontos (um ponto é formado a cada período) e do diâmetro da poça de fusão. Para facilitar os equacionamentos matemáticos, considerou-se que durante o tempo de pulso da corrente a velocidade de soldagem seja igual à zero, assim espera-se obter poças de fusão (pontos) com geometria circular.

A Figura 5.1 mostra um cordão com um único ponto de solda, ou seja, uma solda com apenas um período de pulsação da corrente, sendo a corrente de base muito baixa.

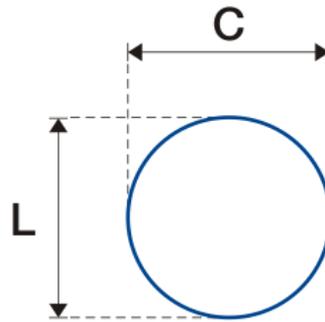


Figura 5.1 – Ponto de solda elementar

Neste caso, pode-se dizer que, o comprimento C do cordão será igual à largura L. A Figura 5.2 mostra um cordão com dois pontos e uma sobreposição S.

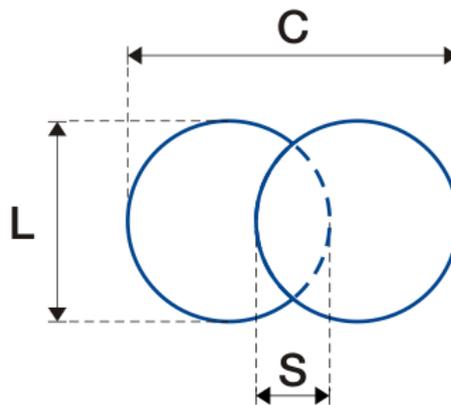


Figura 5.2 – Cordão de solda com dois pontos

O comprimento do cordão para este caso é mostrado na Equação 5.1.

$$C = L + (L - S)$$

Equação 5.1

A Figura 5.3 mostra que para um cordão com três pontos têm-se duas sobreposições.

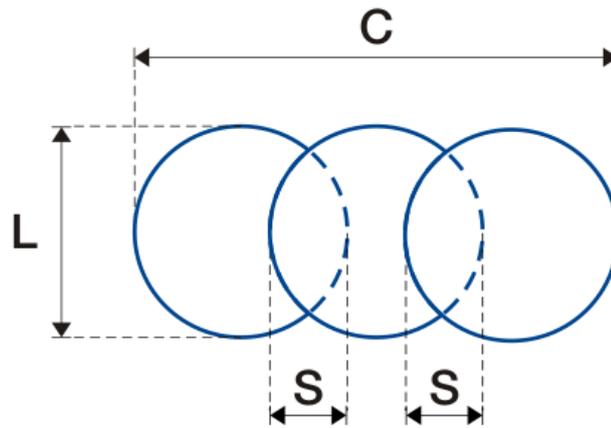


Figura 5.3 – Cordão de solda com três pontos

O comprimento do cordão para este caso é mostrado na Equação 5.2.

$$C = L + (L - S) + (L - S) \quad \text{Equação 5.2}$$

Analisando a Equação 5.2, pode-se concluir que a cada novo período de pulsação da corrente o termo $(L - S)$ é adicionado à equação do comprimento do cordão. Desta forma, para n períodos de pulsação da corrente, pode-se escrever o comprimento do cordão, conforme a Equação 5.3.

$$C = L + (n - 1)(L - S) \quad \text{Equação 5.3}$$

Resolvendo a Equação 5.3, tem-se a Equação 5.4.

$$C = L + nL - nS - L + S$$

$$C = nL - nS + S$$

$$C = nL - (n - 1)S \quad \text{Equação 5.4}$$

Onde L é a largura do ponto, S é a sobreposição e n é o número de períodos de pulsação da corrente.

A velocidade de soldagem pode ser calculada por intermédio da Equação 5.5.

$$V = \frac{C}{nT} \quad \text{Equação 5.5}$$

Onde C é o comprimento do cordão e n é o número de períodos T. Substituindo-se a Equação 5.4 na Equação 5.5, tem-se Equação 5.6.

$$V = \frac{nL - (n-1)S}{nT} = \frac{nL - nS + S}{nT} = \frac{nL}{nT} - \frac{nS}{nT} + \frac{S}{nT} = \frac{L}{T} - \frac{S}{T} + \frac{S}{nT} = \frac{1}{T} \left(L - S + \frac{S}{n} \right)$$

$$V = \frac{1}{T} \left(L - S \left(1 - \frac{1}{n} \right) \right) \quad \text{Equação 5.6}$$

No limite em que n cresce na Equação 5.6, o termo $\left(1 - \frac{1}{n} \right)$ tende a 1. Desta forma a Equação 5.6, pode ser reescrita conforme a Equação 5.7, que fornece a velocidade de soldagem em função da largura do ponto, da sobreposição desejada e do período de pulsação da corrente.

$$V = \frac{L - S}{T} \quad \text{Equação 5.7}$$

5.1.2 Determinação da corrente de pulso

Tendo em vista que a corrente de base utilizada neste procedimento é suficientemente baixa, apenas para manter o arco aberto, tem-se que a fusão da peça ocorre efetivamente no intervalo da corrente de pulso. A princípio, a corrente utilizada para realizar o ponto no primeiro passo da metodologia, consistiria na corrente de pulso necessária para a realização do cordão de solda. Entretanto, na soldagem TIG pulsada, o ponto atual sofre influência térmica devido ao pré-aquecimento da chapa ocasionado pelos pontos anteriores. Desta forma, é necessário reduzir proporcionalmente a energia de soldagem a fim de compensar os

efeitos da temperatura no qual se encontra a peça no instante da realização dos pontos de solda.

Como forma de reduzir a energia de soldagem, atuou-se na amplitude da corrente de pulso, uma vez que o tempo de pulso incide diretamente na velocidade de soldagem. Para determinar a amplitude da corrente de pulso, desenvolveu-se um método que consiste na realização de um cordão de solda dividido em vários trechos, chamados estágios. Para cada estágio determina-se a sua duração e a amplitude da corrente de pulso a partir de um percentual da corrente utilizada na realização do ponto de solda no primeiro passo da metodologia. As demais variáveis (t_p , t_b , I_b e V_s) permanecem inalteradas.

A aplicação deste método ocorre em duas etapas. Na primeira, para cada estágio ajusta-se a amplitude da corrente de pulso de 10 em 10% e realiza-se a soldagem (ajuste grosso). Em seguida, realiza-se a segunda etapa, que consiste em aplicar o método novamente ajustando a amplitude da corrente de pulso de 1 em 1 % (ajuste fino) em torno do valor percentual que na primeira etapa resultou numa largura da raiz próxima da encontrada no ponto de solda. Estas duas etapas consistem, respectivamente, num ajuste grosso e fino, possibilitando determinar a amplitude da corrente que resulte numa raiz dimensionalmente compatíveis aquelas realizadas no ponto de solda.

5.2 Bancada de desenvolvimento de testes de soldagem

Para o desenvolvimento da metodologia destinada à determinação dos parâmetros na soldagem TIG pulsada, foi montada uma bancada de desenvolvimento de testes de soldagem (Figura 5.4). Nesta, com exceção do microcomputador, todos os componentes foram desenvolvidos no próprio LABSOLDA, o que permitiu total flexibilidade para atender as necessidades que foram surgindo no decorrer do trabalho.

Esta bancada de desenvolvimento opera de forma totalmente integrada, onde o microcomputador, equipado com o software de controle e a interdata, controla de forma simultânea o Tartilope V1 e a fonte de soldagem MINITEC 200.



Figura 5.4 – Bancada de desenvolvimento. Em (1) Unidade de controle, em (2) Carro do Tartílope, em (3) Mesa de soldagem, em (4) Computador equipado com a Interdata e em (5) Fonte de soldagem Minitec 200

No diagrama da Figura 5.5 é possível observar o fluxo de informações existente na bancada.

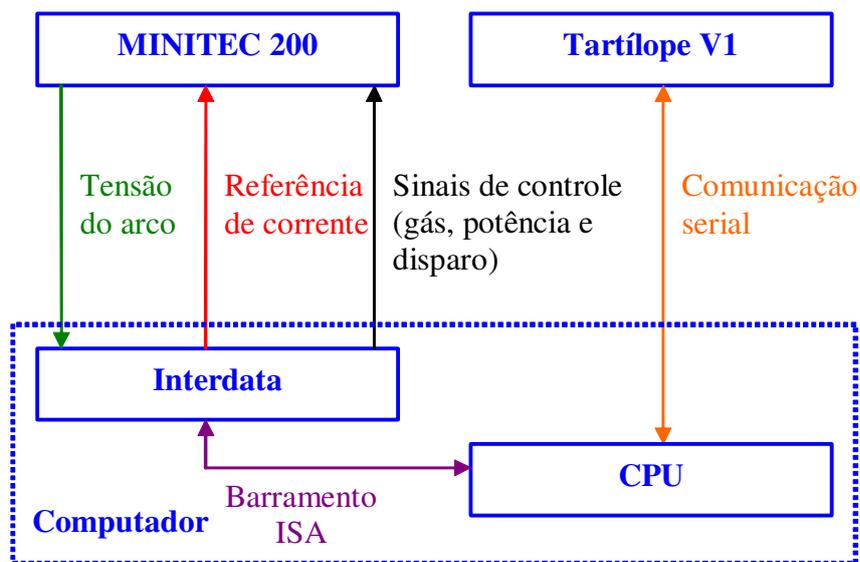


Figura 5.5 – Fluxo de informações da bancada de desenvolvimento

O controle do Tartílope V1 é realizado por meio de uma comunicação serial padrão RS-232 (32)(33)(34). Já o controle da fonte de soldagem MINITEC 200 foi realizado por intermédio de uma conexão, já existente no equipamento, destinada para operações em modo remoto. Este modo de operação permite que a fonte de soldagem seja comandada por qualquer agente externo desde que o padrão dos sinais seja compatível.

No fluxo de informações que transitam pela bancada, o sinal de referência de corrente e de tensão do arco utilizam canais analógicos de 12 bit e os sinais de controle (gás, potência e disparo) são digitais.

5.2.1 Tartílope V1

O Tartílope V1 é um sistema de deslocamento automático destinado às aplicações de soldagem e corte. Seu controle microcontrolado permite a realização de deslocamentos a baixa velocidade, como o de uma tartaruga, sem perder o seu desempenho quando o requisito é velocidade, como no caso de um antílope, daí a origem do nome Tartílope (Figura 5.6). Este equipamento é composto pelos seguintes itens:

1 - Carro: É o componente móvel do conjunto que efetivamente realiza o movimento de deslocamento da tocha. Seu acionamento eletromecânico é realizado por um motor de passo.

2 - Braço de Fixação: Montado sobre o carro, permite a correta fixação da tocha.

3 - Trilho: É o local por onde se desloca o carro do Tartílope V1.

4 - Teclado Remoto: Consiste na interface entre a máquina e o usuário.

5 - Unidade de Controle e Potência: é a unidade de processamento de dados, de comunicação, de controle e de potência do Tartílope V1.

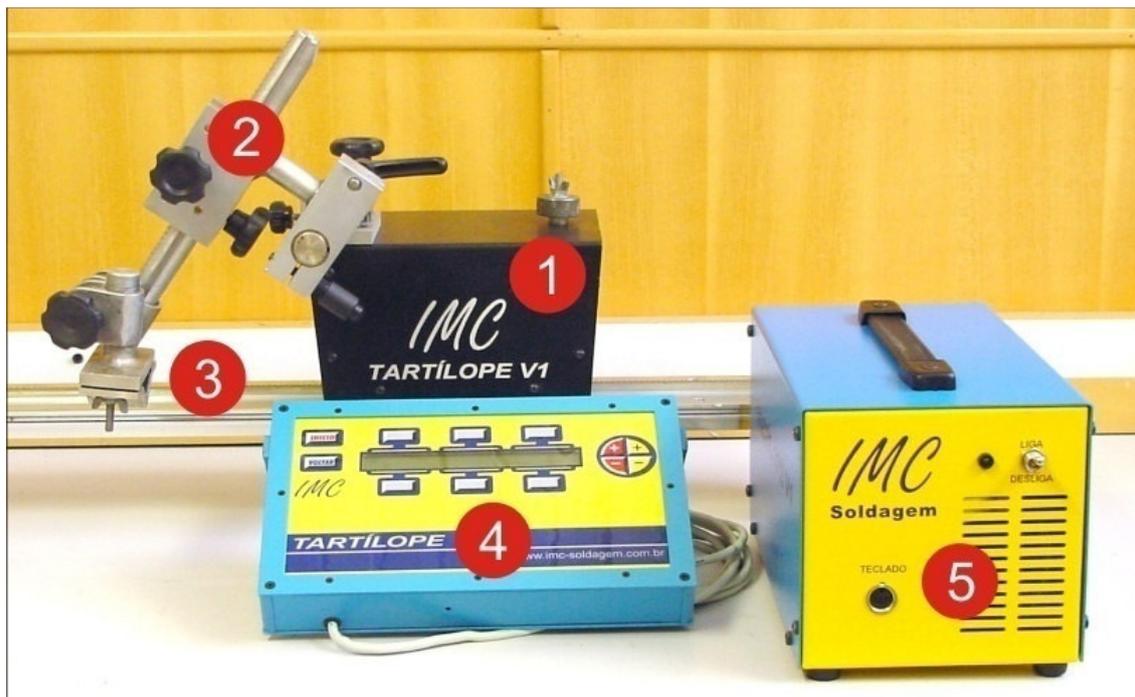


Figura 5.6 – Tartílope V1

5.2.2 MINITEC 200

Apesar do sistema de soldagem orbital desenvolvido empregar a fonte de soldagem Larry Flex, na bancada de desenvolvimento da metodologia utilizou-se a fonte de soldagem MINITEC 200 (35) devido esta já permitir o seu controle pela Interdata.

A fonte de soldagem MINITEC 200 consiste numa versão de menor potência da fonte de soldagem multi-processo DIGITEC 450. Seu sistema de controle é composto por duas unidades microcontroladas, uma responsável pela interface entre homem/máquina e controle do equipamento (CONTROLE) e outra responsável por gerar as formas de onda do processo correspondente (G.O.). Ao ser disparada a soldagem, a controle envia para a G.O., através de uma comunicação serial padrão I²C, o valor das variáveis. A G.O., com o auxílio de temporizadores específicos, monta as formas de onda do processo e através de conversores digital-analógicos comanda o transistor da estrutura de potência.

A estrutura de potência desta fonte segue a tecnologia de fontes com chaveamento no secundário. Nesta, o transistor opera na região de corte e saturação, o que permite o controle da corrente de soldagem com reduzidas perdas por efeito joule. A Figura 5.7 mostra uma aquisição de corrente realizada com o

objetivo de aferir o equipamento. Nesta aquisição, realizada com o SAP, a corrente de pulso foi regulada em 100 A, corrente de base em 50 A e tempos de pulso e de base em 0,5 s.

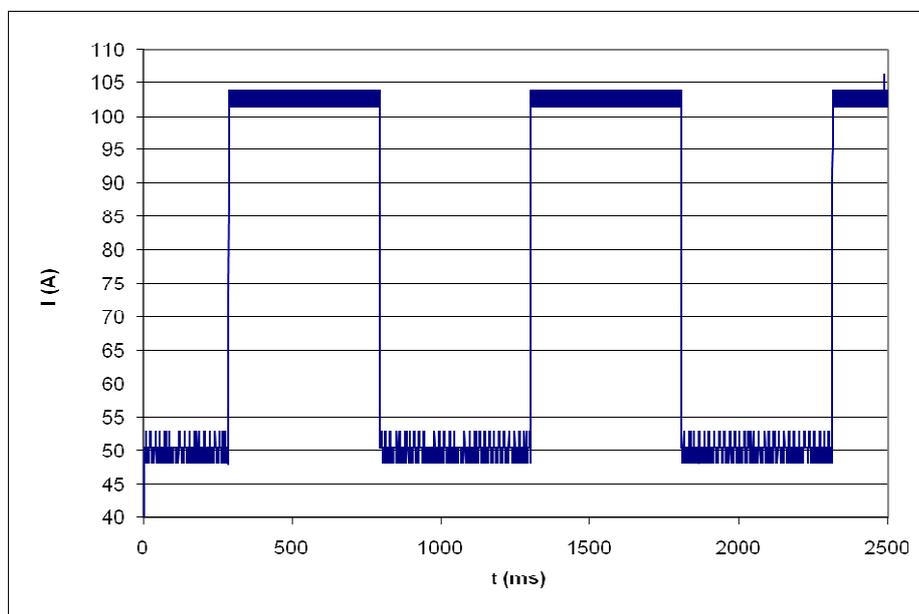


Figura 5.7 – Aquisição de corrente na Minitec 200

5.2.3 Mesa de soldagem

Devido à maior facilidade de aquisição e menor custo em relação aos tubos, a simulação da soldagem de tubos foi realizada em chapas planas. Assim, para a realização de ensaios, foi utilizada uma mesa de soldagem equipada com grampos de fixação para os corpos de prova (Figura 5.8). Esta apresenta uma cavidade central na qual circula gás inerte com o intuito de proteger a face oposta a ser soldada, conhecido como gás de purga. Além disso, para auxiliar a dissipação de calor da peça a ser soldada durante a realização dos ensaios e assim facilitar a aproximação do corpo de prova a uma peça infinita, a base na mesa de soldagem é confeccionada de chapas de cobre.

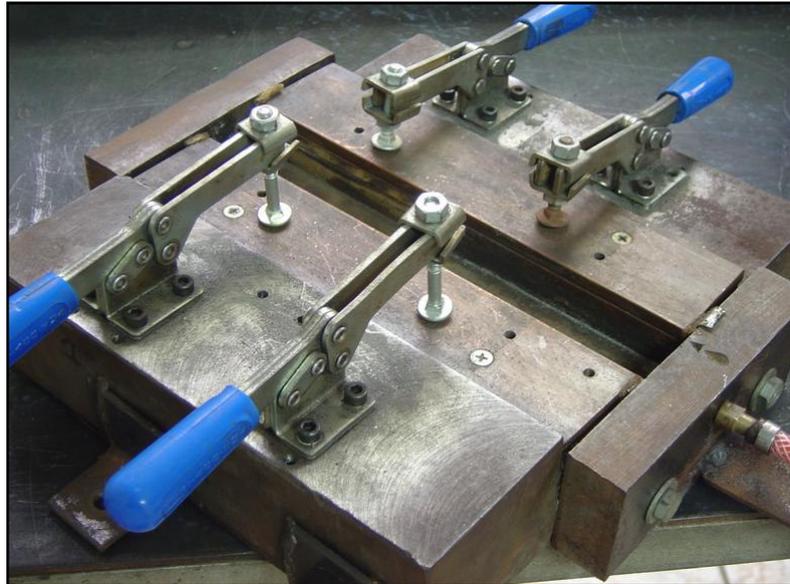


Figura 5.8 – Mesa de soldagem

5.2.4 Microcomputador equipado com Interdata

A Interdata (36) é uma placa para PC, de conexão ISA, destinada ao controle e a aquisição de sinais digitais e analógicos de modo paralelo por meio de software. Esta placa é composta por um módulo principal e um módulo de expansão analógica, conforme mostra a Figura 5.9.

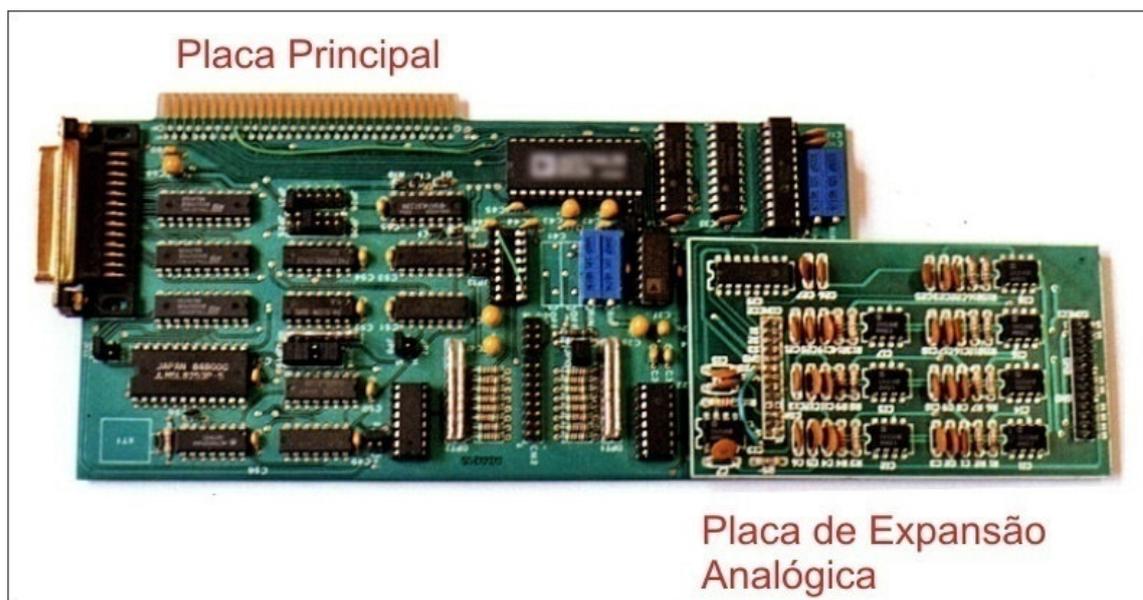


Figura 5.9 - Interdata

A placa principal contém as conexões de aquisição e controle digital e de aquisição analógica. A placa de expansão analógica faz-se necessário nos casos onde se deseja comandar sinais analógicos. Nesse trabalho, a saída de sinais analógicos foi utilizada para realizar o controle da corrente de soldagem da fonte MINITEC.

5.2.5 Software de controle da bancada de desenvolvimento de testes de soldagem

Para viabilizar a realização dos ensaios de forma rápida e eficiente foi desenvolvido um software de controle dedicado, que por intermédio da Interdata é capaz de controlar o Tartílope V1 e a MINITEC 200 simultaneamente.

Para o desenvolvimento deste software (PLC_V1_D), utilizou-se como plataforma um software já existente no LABSOLDA utilizado no controle da bancada Plasma-Alimentado. Desta forma, foram feitas alterações para eliminar as funções que não seriam utilizadas e principalmente, implementar as funções que se faziam necessárias. Este software é escrito em linguagem de programação Pascal.

A Figura 5.10 mostra a tela do programa de controle da bancada, sendo possível identificar:

- 1 – Parâmetros de forma de onda da corrente
- 2 – Vazão de gás (não utilizado neste trabalho)
- 3 – Configurações do Tartílope V1
- 4 – Configurações de soldagem
- 5 – Comandos de soldagem
- 6 – Informações ao usuário (Mensagens de aviso, posição do Tartílope, tempo, corrente e tensão de soldagem)
- 7 – Barra de status

A tela do programa é dividida em quatro regiões de parâmetros e três de informações para o usuário. Para ter acesso a uma região de parâmetros, basta apertar a tecla correspondente ao número que aparece no canto superior esquerdo da mesma.

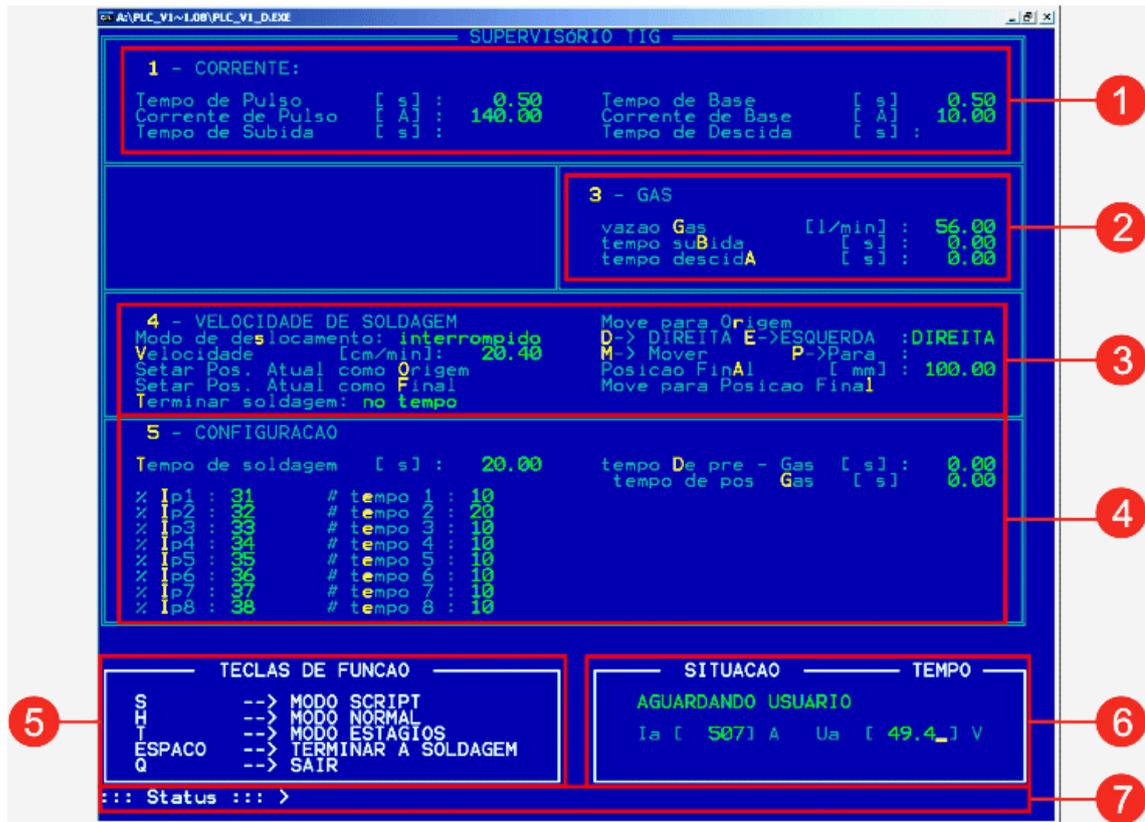


Figura 5.10 – Tela do programa de controle da bancada

Uma vez selecionada uma região, seu título ficará intermitentemente piscando na cor verde, indicando que aquela região está ativa. Cada variável, ou parâmetro regulável, aparecerá com uma de suas letras destacadas na cor branca, a fim de indicar qual tecla deve ser pressionada para alterar o seu valor, conforme mostra a Figura 5.11.

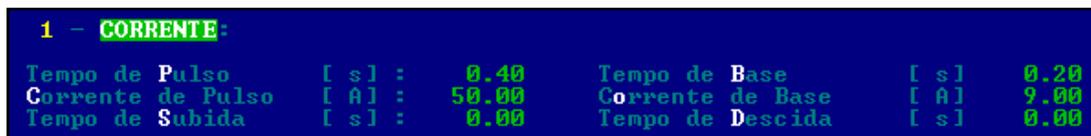


Figura 5.11 – Seleção da região de parâmetros de forma de onda da corrente

A região 4 (Figura 5.12) foi totalmente desenvolvida para este trabalho, uma vez que o programa original não contemplava o controle do Tartilope. Nesta dispõem-se das seguintes opções:

Modo de deslocamento: Define se o Tartílope V1 deve movimentar-se com velocidade constante (modo contínuo) ou de modo sincronizado, no qual o mesmo imprime velocidade nula na fase de pulso da corrente (modo interrompido).

Move para a origem: Desloca o Tartílope V1 até a posição definida como origem do sistema.

Velocidade: Define a velocidade de deslocamento do Tartílope V1.

Direita/Esquerda: Define o sentido de deslocamento do Tartílope V1, lembrando que a nomenclatura usada trata-se apenas de uma convenção.

Setar pos. atual como origem: Seta a posição atual do Tartílope V1 como a origem do sistema.

Mover/Parar: Movimenta o Tartílope V1 indefinidamente de acordo com o sentido e a velocidade definida.

Setar pos. atual como final: Seta a posição atual do Tartílope V1 como a posição de destino.

Posição final: Seta a posição de destino do Tartílope V1.

Mover para a posição final: Desloca o Tartílope V1 até a posição de destino.

Terminar soldagem: Define se a soldagem será finalizada na posição final ou após o tempo definido na região 5.

```

4 - VELOCIDADE DE SOLDAGEM
Modo de deslocamento: contínuo
Velocidade          lca/minl: 100.00
Setar Pos. Atual como Origem
Setar Pos. Atual como Final
Terminar soldagem: na posição final
Move para Origem
D-> DIREITA E->ESQUERDA :DIREITA
M-> Mover          P->Parar :
Posicao Final      [mm] : 100.00
Mover para Posicao Final
    
```

Figura 5.12 – Região de configuração do Tartílope

Na região 5 encontra-se a configuração do tempo de soldagem (para o caso em que a soldagem é configurada para finalizar no tempo) e as variáveis do modo de operação estágios, descrito a seguir.

5.2.6 Modos de operação do software

Basicamente a bancada pode operar em três modos, implementados de acordo com as necessidades que foram surgindo no decorrer do trabalho. Tendo em vista que a bancada é totalmente comandada pelo software de controle, estes modos de

operação tornaram-se fáceis de serem implementados, uma vez que sua implementação tornou-se uma questão de software.

a) Modo Script

Este modo realiza o procedimento específico citado no item 5.1, sendo habilitado quando a tecla S é pressionada. Neste, após a abertura do arco, o Tartilope é deslocado até a posição final imprimindo a corrente de base da região 1. Ao chegar à posição final é realizado um ponto de solda, cuja duração e amplitude da corrente correspondem respectivamente ao tempo de pulso e corrente de pulso da região 1. Em seguida, o arco é extinto e o Tartilope retorna a sua posição de origem automaticamente, conforme é retratado no gráfico da Figura 5.13.

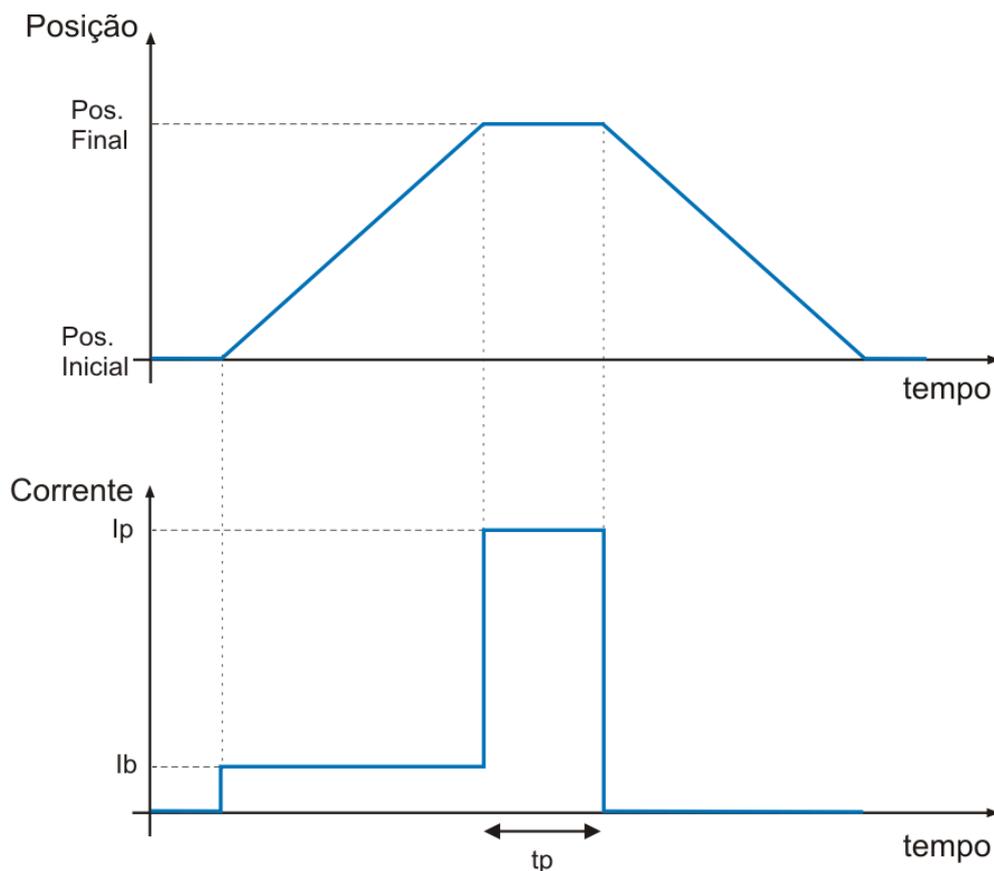


Figura 5.13 – Procedimento de realização do ponto (Modo Script)

b) Modo Estágios

Com o intuito de viabilizar a determinação da corrente de pulso a ser utilizada no cordão (item 5.1.2), foi implementado no software de controle o modo estágios. Este modo é habilitado pressionando-se a tecla T, e a partir do conjunto de variáveis presentes na região 1, configura-se na região 5 o tempo de duração de cada estágio, bem como o percentual da corrente de pulso correspondente. Após a abertura do arco, a solda é iniciada com as variáveis do primeiro estágio, transcorrido o tempo do primeiro estágio, as variáveis são alteradas automaticamente para as variáveis do segundo estágio, e assim sucessivamente até que o último estágio seja realizado (Figura 5.14).

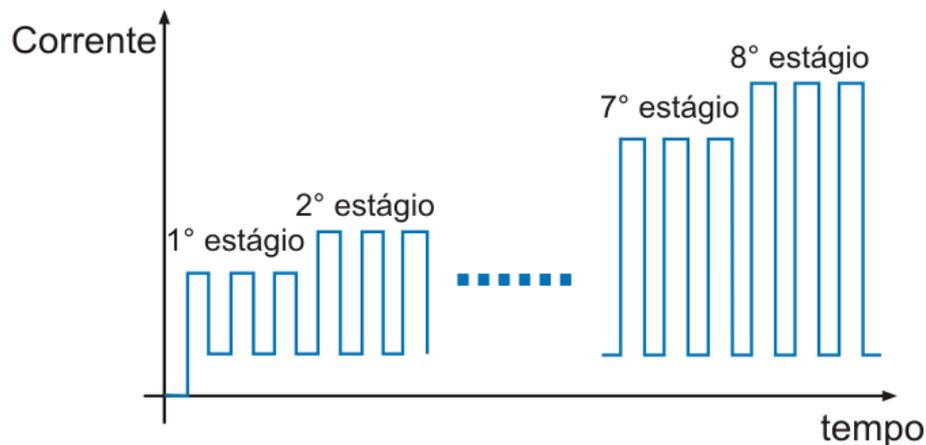


Figura 5.14 – Forma de onda da corrente no modo de operação Estágios

c) Modo Normal

Este modo de operação é destinado a operações de soldagem onde se deseja realizar um cordão de solda. Pressionando-se a tecla H, este realiza a soldagem utilizando as variáveis da região 1, sendo que o deslocamento do Tartílope pode ocorrer de forma contínua ou interrompida e a finalização da soldagem na posição final ou no tempo de acordo com o que estiver definido na região 4.

Em todos os modos de operação, o deslocamento do Tartílope ocorre somente após a abertura do arco e o gás de purga é acionado simultaneamente com o gás de proteção que flui pela tocha de soldagem. Para encerrar a operação de soldagem a qualquer momento basta pressionar a tecla barra de espaço.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS E ANÁLISE

6.1 Soldas de união de tubos

Foram realizadas soldas de união de tubos de diâmetro de 76,2 mm (3 polegadas) e espessura de parede de 1,2 mm, utilizando-se a metodologia de determinação de parâmetros para a soldagem TIG com corrente pulsada e o sistema de soldagem orbital desenvolvidos. Em todas as soldas realizadas, o objetivo foi de promover uma solução na qual a raiz se mostrasse consistente, no que diz respeito à sua continuidade, sendo arbitrado como largura ótima 2 mm. Nestas soldas o ângulo de ataque do eletrodo foi de 90° e utilizado argônio como gás de purga (8 L/min).

6.1.1 Soldagem com corrente pulsada aplicando a metodologia desenvolvida

Com o intuito de obter cordões de solda com 2 mm de largura na raiz a partir de uma corrente pulsada com tempos de pulso e de base de 0,4 s (arbitrado), aplicou-se a metodologia em chapas com a mesma espessura de parede dos tubos (1,2 mm), realizando pontos de solda com amplitudes de corrente que resultassem em pontos cuja largura apresentasse cerca de 2 mm (Figura 6.1).

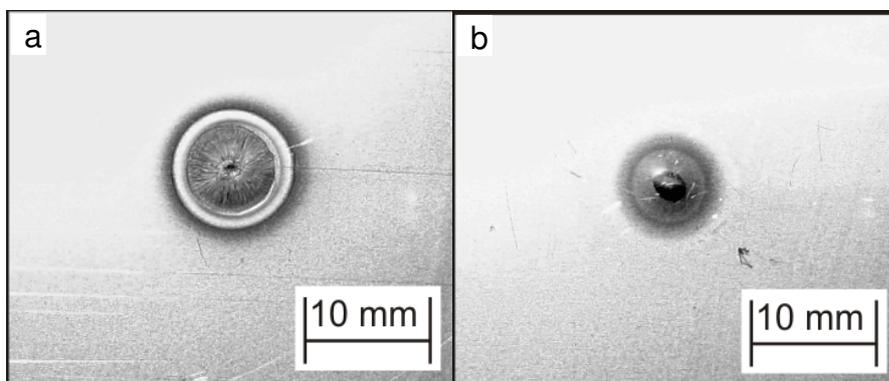


Figura 6.1 – Ponto de solda, em (a) face e em (b) raiz. Parâmetros: I: 130 A e t: 0,4 s.

Na seqüência, calculou-se a velocidade média de soldagem a partir da largura encontrada na raiz do ponto, o período de pulsação da corrente (0,8 s) e a sobreposição desejada entre os pontos de solda na raiz (50 %), utilizando a equação previamente concebida (Equação 5.7), o que resultou numa velocidade de 1,25 mm/s (7,5 cm/min) conforme mostra Equação 6.1.

$$V = \frac{L-S}{T} = \frac{2mm-1mm}{0,8s} = 1,25mm/s \quad \text{Equação 6.1}$$

Uma vez determinadas a corrente de base, velocidade de soldagem e tempos de pulso e de base, aplicou-se o terceiro passo da metodologia que consiste na determinação da corrente de pulso. Nestes ensaios utilizou-se um passo de 10 % no incremento da corrente de pulso e um tempo de duração de cada estágio de 10 s (Figura 6.2).

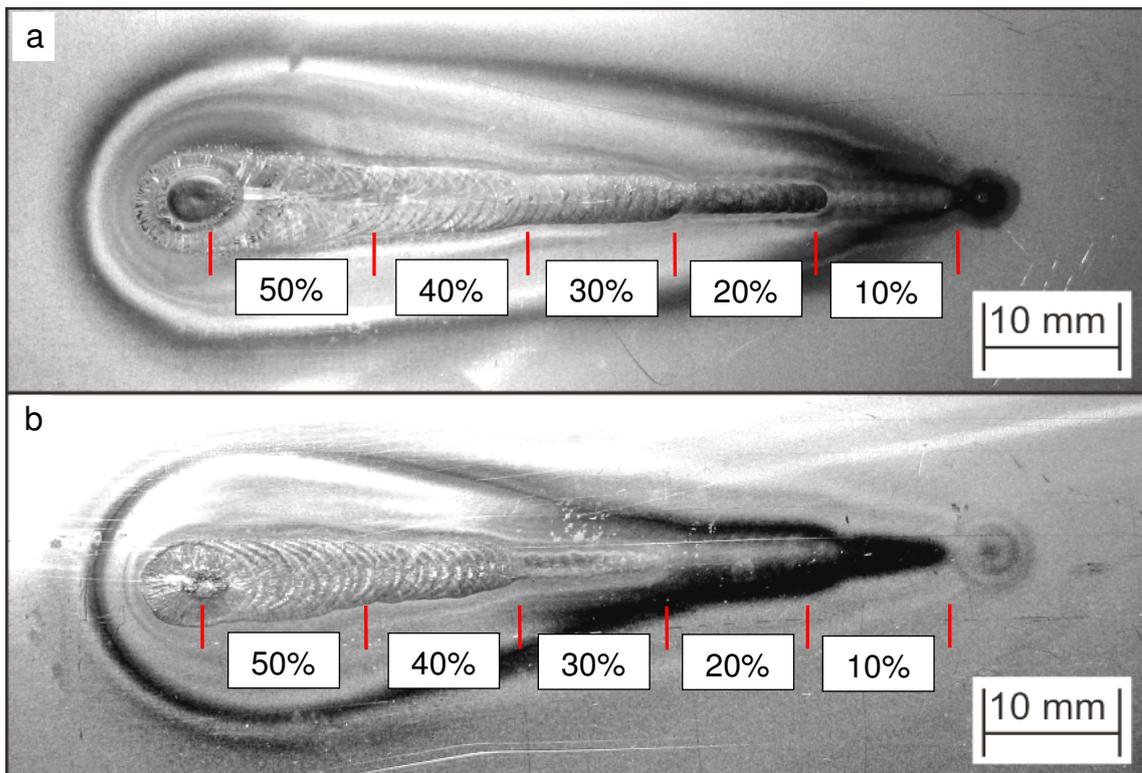


Figura 6.2 – Ensaio para a determinação da corrente de pulso (ajuste grosso). (a) Face e (b) raiz da solda

Como se pode observar, com uma corrente de pulso igual a 50 % do valor de corrente utilizado para a realização do ponto, o cordão de solda apresentou uma largura, tanto na face como na raiz, extremamente exagerada devido ao excesso de energia de soldagem. Entretanto, com uma redução cerca de 30 %, na amplitude do pulso de corrente, a largura da raiz se mostrou próxima de 2 mm. Com base nisso, novos ensaios foram realizados, com os mesmos 10 s de tempo de duração de cada estágio e incrementos de 1 % na amplitude da corrente (Figura 6.3).

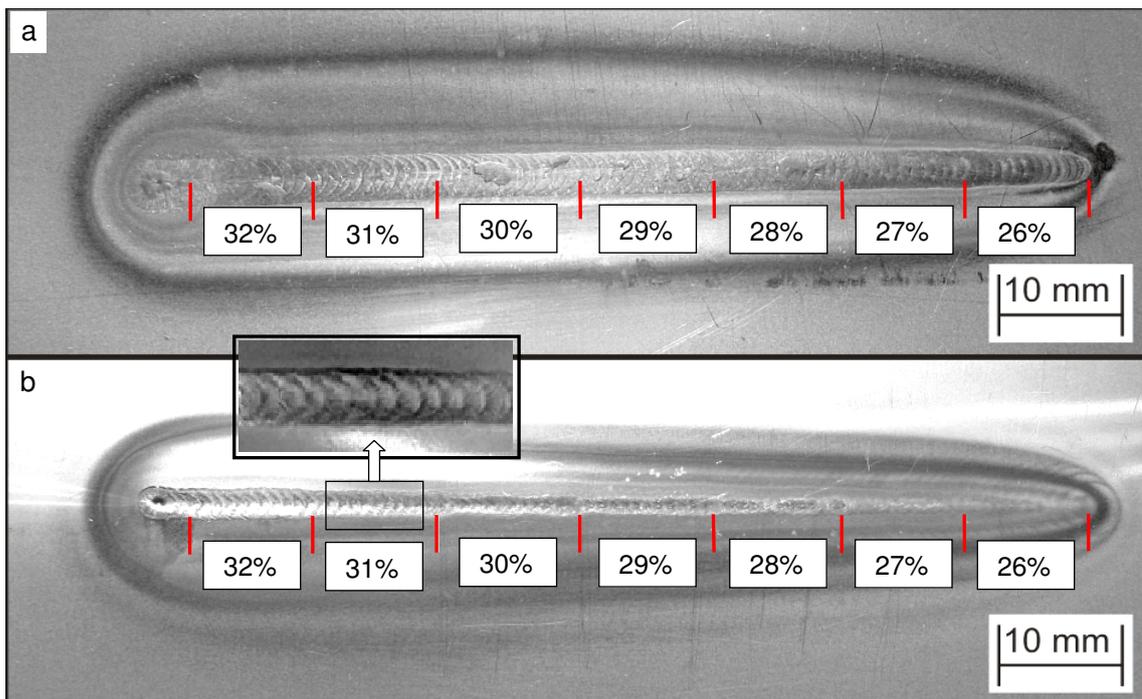


Figura 6.3 - Ensaio para a determinação da corrente de pulso (ajuste fino). (a) Face e (b) raiz da solda

Analisando a raiz da solda, percebe-se que para uma corrente de pulso igual a 31 % do valor de corrente utilizado para realizar o ponto, ou seja, 40 A, houve a repetição das condições de largura da raiz do ponto realizado inicialmente. Desta forma, identificada a corrente de pulso a ser empregada na soldagem do cordão, obteve-se por completo todo o conjunto de parâmetros para a soldagem TIG pulsada.

Utilizando o valor das variáveis resultante da aplicação da metodologia e fazendo uso do equipamento de soldagem orbital, foram realizadas soldas de união de tubos com corrente contínua pulsada.

Cabe salientar que toda a aplicação da metodologia na determinação dos parâmetros de soldagem foi realizada no centro de chapas (Figura 6.1, Figura 6.2 e Figura 6.3). Assim, ao se levar a solução para uma junta, como é o caso da soldagem de união dos tubos, a largura da solda se apresentou aumentada em cerca de 10 %, conforme pode ser visto na Figura 6.4. Como a largura da raiz no qual se está trabalhando é relativamente pequena, este efeito se mostrou pouco pronunciado, não sendo relevante as dimensões do ponto aplicar a metodologia numa junta onde existem outras variáveis como o próprio alinhamento da tocha. De certa forma, isto se constitui num efeito positivo, uma vez que o aumento de largura da raiz atua no sentido de assegurar sua continuidade e conseqüentemente a sanidade da solda realizada.

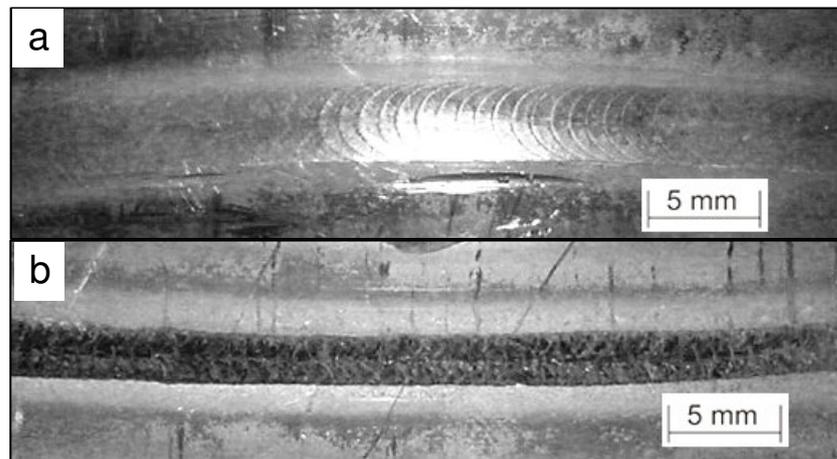


Figura 6.4 – Solda de união de tubos realizada com corrente pulsada. Detalhe entre 6 e 9 horas, (a) face e (b) raiz da solda. Parâmetros: I_p : 40 A, t_p : 0,4 s, I_b : 10 A, t_b : 0,4 s, V_{sp} : 0 mm/s 0 (cm/min), V_{sb} : 2,5 mm/s (15 cm/min) e V_{ms} : 1,25 mm/s (7,5 cm/min)

A Figura 6.5 mostra a seção transversal da solda para as principais posições de soldagem, com o tubo soldado na posição horizontal, onde se pode avaliar o comportamento do cordão ao longo de todo o perímetro do tubo.

Os resultados mostraram que na medida em que o arco avançou ao longo da junta, a área fundida aumentou, possivelmente resultado do aquecimento inerente a geometria dos tubos, no qual conduz o arco à região já aquecida de início da solda e a baixa velocidade de soldagem desenvolvida. Apesar do desalinhamento entre os

tubos ao longo de todo o perímetro, decorrente do reaproveitamento e da própria excentricidade dos mesmos, o sistema desenvolvido (equipamento e procedimento) se mostrou robusto, isto é, pouco sensível a fugir dos critérios de aceitabilidade, garantindo a qualidade da solda. Mesmo na posição de soldagem mais crítica (sobre-cabeça), onde o desalinhamento apresentado foi da ordem de 1 mm, obteve-se um cordão de solda com penetração total, livre de defeitos como mordeduras, falta de fusão e escorrimento de material.

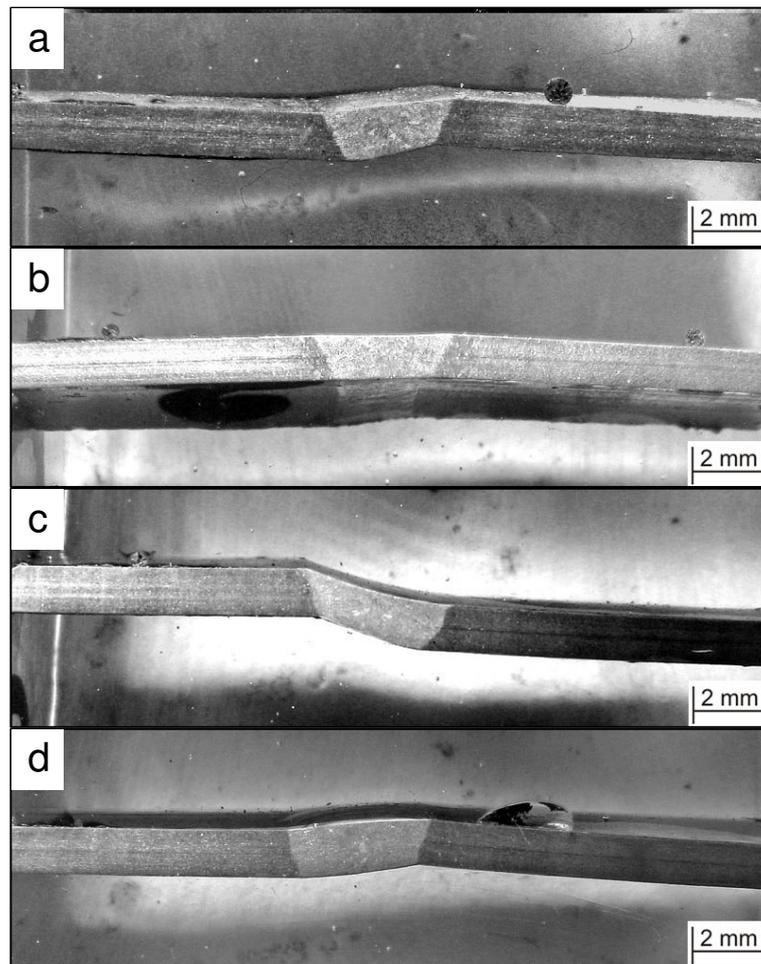


Figura 6.5 - Seção transversal da solda com corrente pulsada: (a) posição plana, (b) vertical descendente, (c) sobre cabeça e (d) vertical ascendente.

6.1.2 Soldagem com corrente pulsada buscando maior velocidade de soldagem

Apesar da solda obtida no item 6.1.1 se apresentar robusta do ponto de vista de processo, a mesma foi realizada com uma velocidade média de soldagem

considerada pequena, 1,25 mm/s (7,5 cm/min). Com base nisso, novas soldas de tubos foram realizadas com o intuito de conduzir a solda com maior velocidade.

De acordo com Equação 5.7 a velocidade de soldagem é diretamente proporcional à largura desejada do ponto de solda na raiz (L) e inversamente proporcional ao período de pulsação da corrente (T). Assim, para conseguir uma maior velocidade de soldagem, optou-se por reduzir o período de pulsação da corrente, sendo utilizado tempo de pulso e de base de 0,2 s, uma vez que os aspectos dimensionais dos cordões devem permanecer fixos (largura da raiz de 2 mm e sobreposição entre os pontos de solda na raiz de 50 %).

Como ponto de partida aplicou-se a metodologia para a determinação dos parâmetros, buscando pontos de solda que apresentassem as características dimensionais desejadas, ou seja, raiz com 2 mm de largura (Figura 6.6).

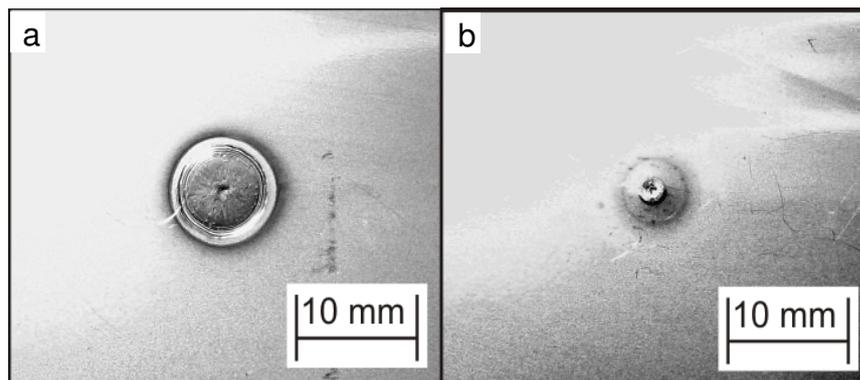


Figura 6.6 - Ponto de solda, (a) face e (b) raiz. Parâmetros: I: 250 A e t: 0,2 s.

Na seqüência, calculou-se a velocidade média de soldagem a partir da largura encontrada na raiz do ponto, o período de pulsação da corrente (0,4 s) e a sobreposição entre os pontos de solda na raiz (50 %), utilizando a equação previamente concebida, o que resultou numa velocidade de 2,5 mm/s (15 cm/min) conforme mostra a Equação 6.2.

$$V = \frac{L - S}{T} = \frac{2\text{mm} - 1\text{mm}}{0,4\text{s}} = 2,5\text{mm/s} \quad \text{Equação 6.2}$$

Seguindo a metodologia, aplicou-se o terceiro passo que consiste na determinação da corrente de pulso. Nestes ensaios utilizou-se um passo de 10 % no

incremento da corrente de pulso e um tempo de duração de cada estágio de 10 s (Figura 6.7).

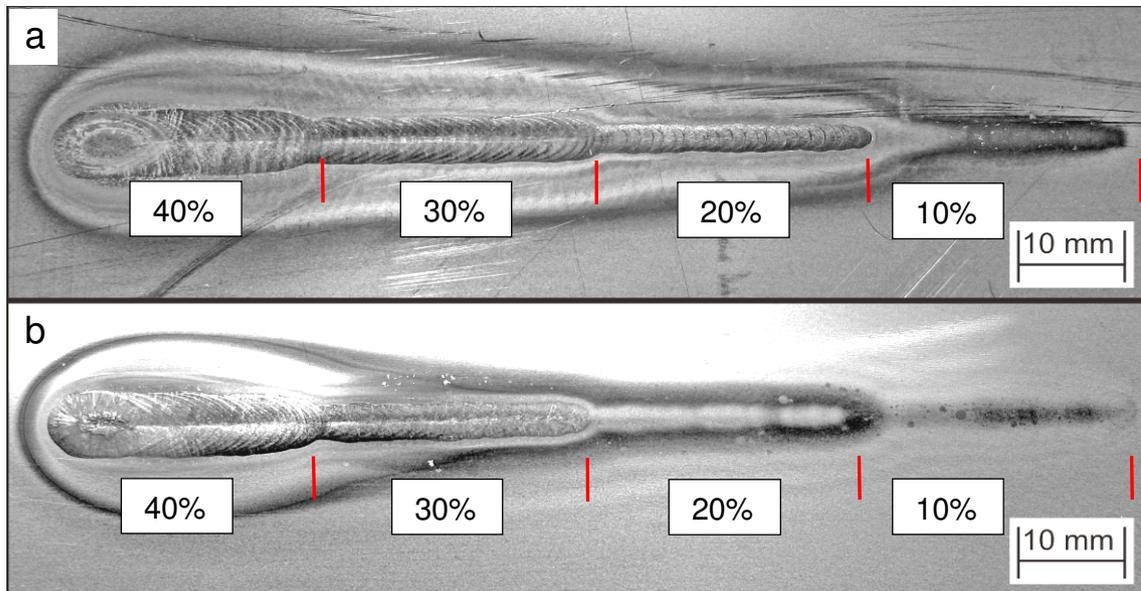


Figura 6.7 - Ensaio para a determinação da corrente de pulso (ajuste fino). (a) Face e (b) raiz da solda

Apesar de serem ajustados oito estágios, com percentuais de corrente que variam de 10 a 80 %, os ensaios foram interrompidos em função de que para uma corrente de pulso igual a 40 % do valor de corrente utilizado para a realização do ponto, o cordão de solda apresentou uma largura, tanto na face como na raiz, extremamente exagerada devido ao excesso de energia de soldagem.

Para uma corrente de pulso de 20 % a raiz da solda se mostrou insuficiente, já o percentual de 30 % resultou numa raiz com largura superior a 2 mm, indicando que a corrente de pulso ideal encontra-se dentro deste intervalo. Assim, novos ensaios foram realizados, com os mesmos 10 s de tempo de duração de cada estágio e um passo de 1 % no incremento da amplitude da corrente (Figura 6.8).

Estes ensaios mostraram que para uma corrente de pulso igual a 24 % do valor de corrente utilizado para realizar o ponto, ou seja, 60 A, houve a repetição das condições de largura da raiz do ponto realizado inicialmente. Desta forma, identificada a corrente de pulso a ser empregada na soldagem do cordão, obteve-se novamente por completo todo o conjunto de parâmetros para a soldagem TIG pulsada.

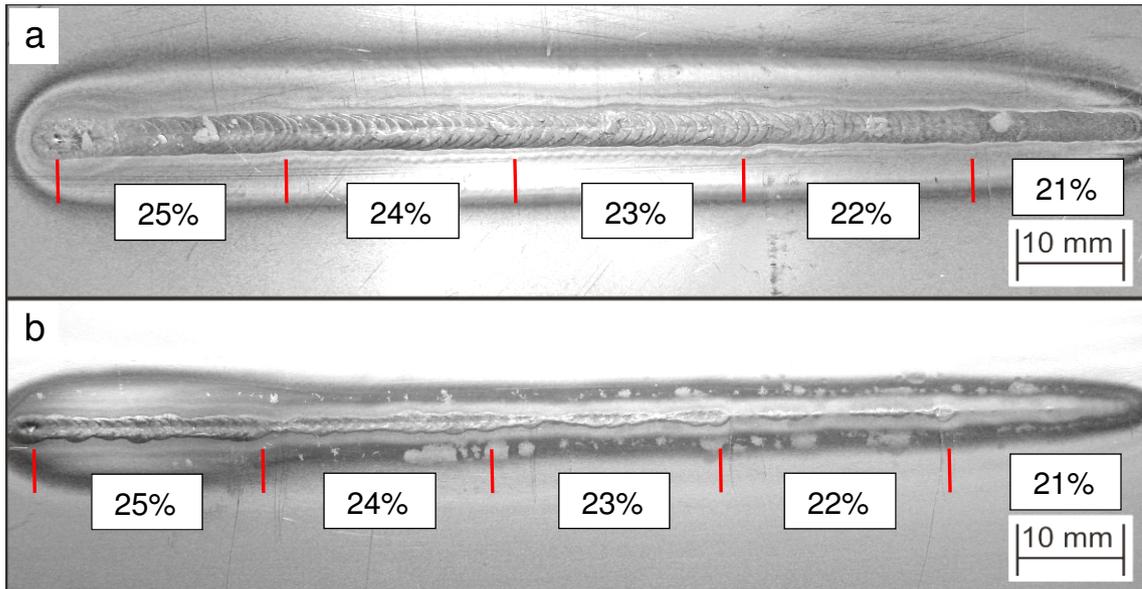


Figura 6.8 - Ensaio para a determinação da corrente de pulso (ajuste fino). (a) Face e (b) raiz da solda

Em seguida, utilizando o valor das variáveis resultante da aplicação da metodologia e fazendo uso do equipamento de soldagem orbital, foram realizadas soldas de união de tubos com corrente contínua pulsada (Figura 6.9).

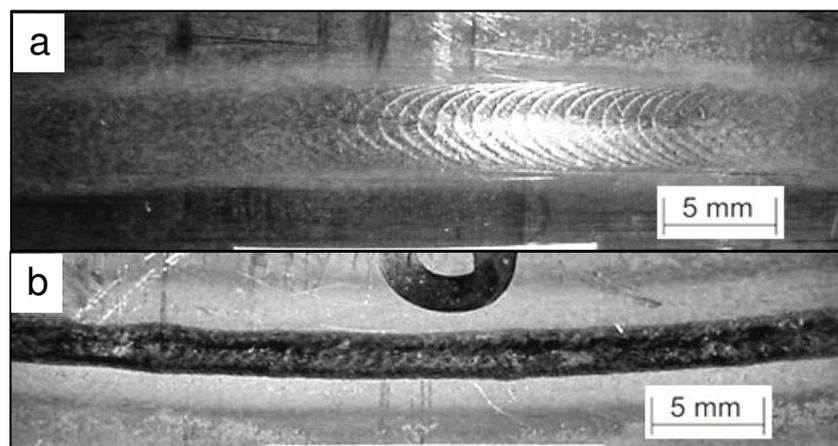


Figura 6.9 - Solda de união de tubos realizada com corrente pulsada. Detalhe entre 6 e 9 horas, (a) face e (b) raiz do cordão. Parâmetros: I_p : 60 A, t_p : 0,2 s, I_b : 10 A, t_b : 0,2 s, V_{sp} : 0 mm/s (0 cm/min), V_{sb} : 5 mm/s (30 cm/min) e V_{ms} : 2,5 mm/s (15 cm/min)

Assim como no exemplo anterior, esta solda apresentou uma raiz cerca de 10 % mais larga em comparação com o que foi encontrado na metodologia, dado ao fato de a mesma ser realizada numa junta.

De acordo com a Equação 5.7 a redução do período de pulsação da corrente pela metade resultou numa velocidade média de soldagem duas vezes maior do que a empregada no item 6.1.1. No entanto, cabe salientar que a corrente média de soldagem fornecida pela metodologia para o presente caso foi de 35 A (10 A superior).

Na Figura 6.10 é mostrada a seção transversal da solda para as principais posições de soldagem, com o tubo soldado na posição horizontal, onde novamente se pode avaliar o comportamento do cordão ao longo de todo o perímetro do tubo.

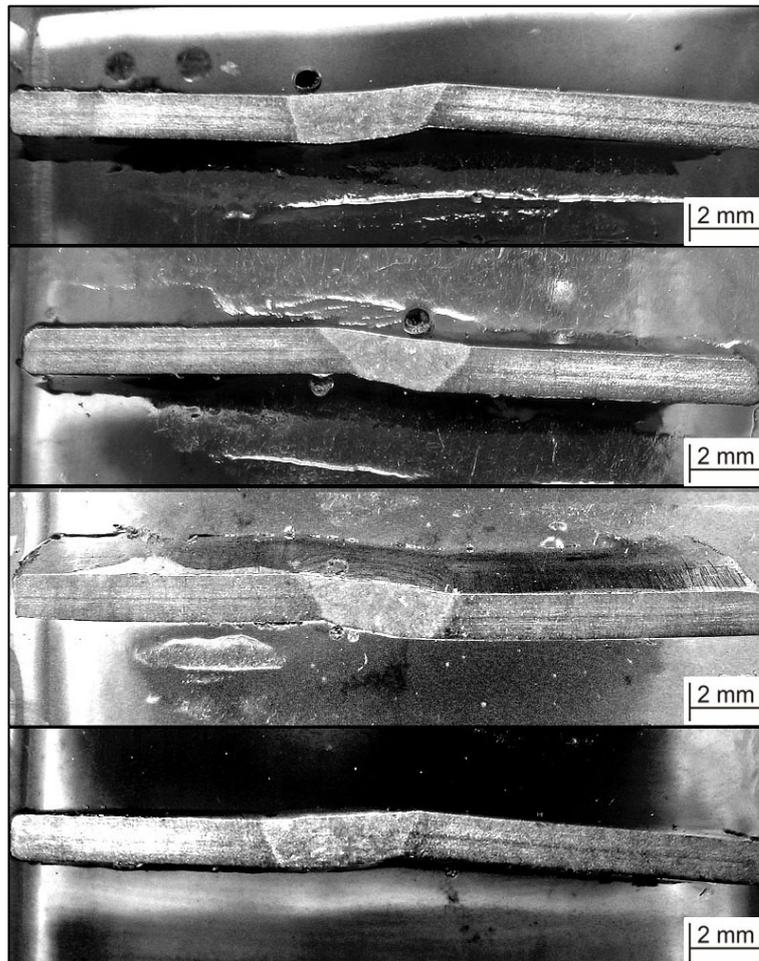


Figura 6.10 - Seção transversal da solda com corrente pulsada: (a) posição plana, (b) vertical descendente, (c) sobre cabeça e (d) vertical ascendente.

Assim como na soldagem do item 6.1.1, a aplicação da metodologia, juntamente com o equipamento de soldagem orbital, resultou num cordão de solda com penetração total, livre de defeitos como mordeduras, falta de fusão e escorrimento de material.

Por fim são feitos alguns comentários acerca da diferença entre I_p definido pelo ponto e aquele de fato aplicado na soldagem.

Aplicando a citada metodologia para três diferentes tempos de pulso e mesma largura na raiz do cordão de solda, obteve-se um conjunto de dados experimentais que possibilitou estabelecer a relação entre a corrente utilizada no ponto, definido no primeiro passo da metodologia, e a corrente utilizada no cordão de solda, esta decorrente do último passo da metodologia

Figura 6.11).

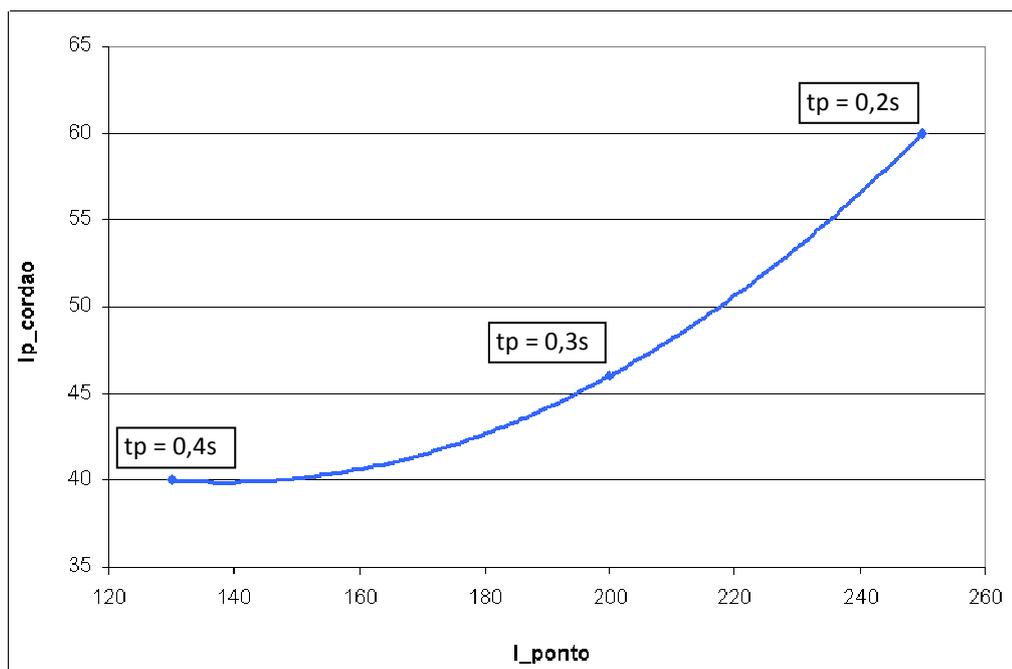


Figura 6.11 – Gráfico de I (ponto) x I (cordão) obtido experimentalmente

Conforme descrito no item 5.1.2, na soldagem com múltiplos pontos o aquecimento da chapa influencia o volume do metal fundido, de forma que, para manter as dimensões dos pontos de solda constantes é necessário reduzir a energia de soldagem.

Como forma de demonstrar este efeito da redução de energia de soldagem, em termos da amplitude da corrente de pulso, toma-se como referência a equação

proposta por Rykalin e Adams para quantificar a temperatura máxima (T_p) a uma distância (Y_p) conhecida da linha de fusão (37), ou seja,

$$\Delta T_p = \frac{HI \cdot \Delta T_f}{\Delta T_f \cdot (2\pi e)^{1/2} \cdot \rho \cdot c \cdot h \cdot Y_p + HI} \quad \text{Equação 6.3}$$

Onde:

$HI =$ Aporte de calor a peça

$\Delta T_p = T_p - T_0$

$\Delta T_f = T_f - T_0$

$T_p =$ Temperatura máxima num dado ponto da peça

$T_0 =$ Temperatura de pré – aquecimento da chapa

$T_f =$ Temperatura de fusão do material

$\rho =$ Densidade do material

$c =$ Calor específico do material

$h =$ Espessura da chapa

$Y_p =$ Distância da linha de fusão

$e =$ Base dos logaritmos naturais

Resolvendo a Equação 6.3 para Y_p tem-se a Equação 6.4, que relaciona T_p e Y_p com o aporte de calor (HI) e a temperatura (T_0) de pré-aquecimento da chapa.

$$Y_p = \frac{HI}{(2\pi e)^{1/2} \cdot \rho \cdot c \cdot h} \cdot \left(\frac{1}{T_p - T_0} - \frac{1}{T_f - T_0} \right) \quad \text{Equação 6.4}$$

Assim, de acordo com Equação 6.4, com o aumento da temperatura de pré-aquecimento, reduz-se o aporte de calor com o intuito de manter inalterada a temperatura máxima T_p . Esta temperatura sendo constante significa que a distância entre o ponto Y_p e a linha de fusão permaneceu constante. Conseqüentemente, tem-se que a poça de fusão permanece dimensionalmente inalterada, conforme mostra a Figura 6.12.

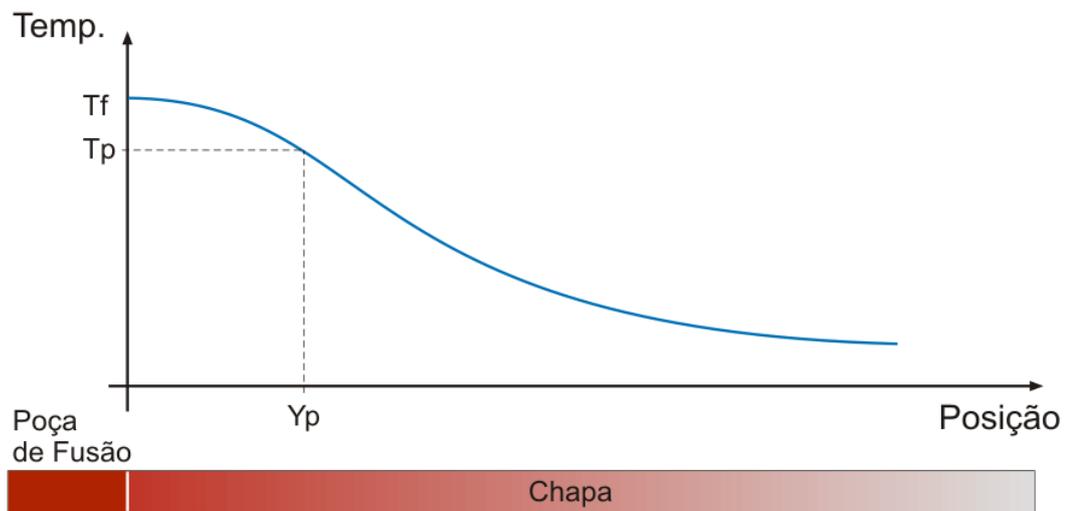


Figura 6.12 – Esquema de medição de temperatura a uma dada distância da linha de fusão de acordo com a equação de Rykalin e Adams

Na tentativa de avaliar a previsão realizada pela Equação 6.4, e assim compará-la qualitativamente com a obtida pela metodologia desenvolvida, a mesma foi resolvida para os três casos citados anteriormente. Para cada um deles, foi calculado a que distância (Y_p) tem-se a temperatura (T_p) de 1200 °C (arbitrada) tendo como parâmetro de entrada a corrente utilizada no ponto e a respectiva temperatura de pré-aquecimento da chapa (20 °C). Em seguida arbitrou-se um valor maior para a temperatura de pré-aquecimento (600 °C) e, de forma iterativa, procurou-se identificar o novo valor da corrente de pico para que a distância (Y_p) permanecesse inalterada. (Tabela 6.1).

Tabela 6.1 – Parâmetros utilizados/obtidos da equação de Adams

<i>I_Ponto</i> (A)	<i>tp</i> (s)	<i>T₀</i> (°C)	<i>Yp</i> (mm)	<i>I_Cordão</i> (A)	<i>tp</i> (s)	<i>T₀</i> (°C)	<i>Yp</i> (mm)
250	0,2	20	3,1	95	0,2	20	1,2
		600	7,8			600	3,1
200	0,3	20	3,2	70	0,3	20	1,2
		600	8,3			600	3,2
130	0,4	20	3,3	45	0,4	20	1,3
		600	8,5			600	3,3

Como resultado obteve-se o gráfico da Figura 6.13, que exibe comportamento semelhante ao apresentado pela metodologia na

Figura 6.11.

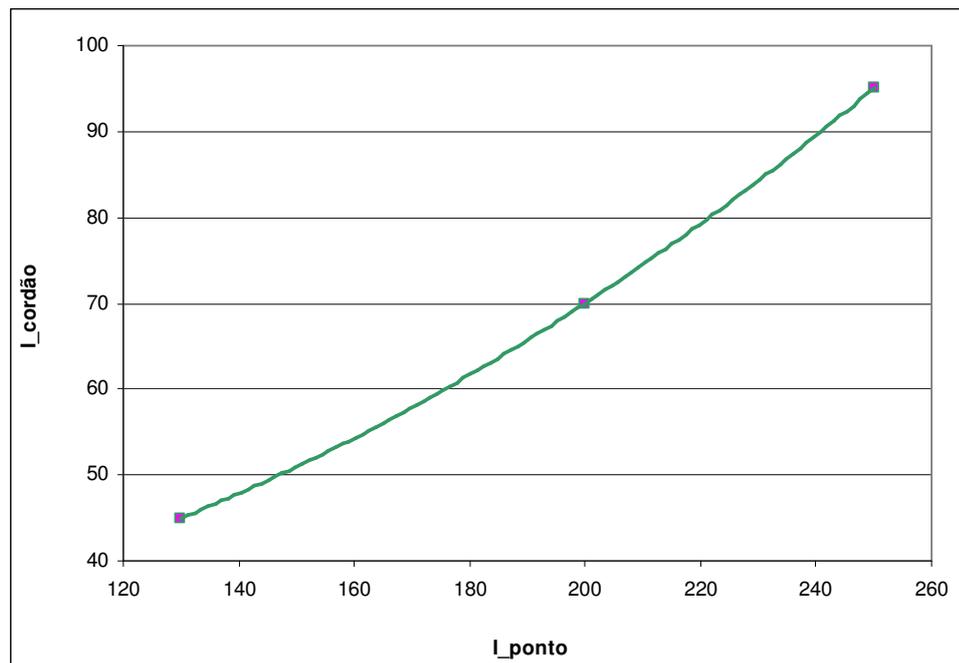


Figura 6.13 - Gráfico de I (ponto) x I (cordão) obtido teoricamente

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

O trabalho consumado por esta dissertação cumpriu a filosofia de pesquisa e desenvolvimento do LABSOLDA, descrita no item 1.2. A razão do cerne da referida filosofia é o fato de que o Brasil é fundamentalmente um importador de equipamentos e tecnologias modernas em processos de fabricação. Em especial, a tecnologia da soldagem é um destes processos, em que mais se observa este fato. Paradoxalmente, o país também é detentor de tecnologias avançadas, como, por exemplo, no setor de aeronáutica. Fica então caracterizada uma lacuna tecnológica de sérias proporções: um país que fabrica aviões, mas não possui tecnologia para a fabricação de equipamentos de soldagem que são necessários para a fabricação destes aviões.

Portanto, a consumação de um equipamento como o aqui apresentado, não representa o mundialmente inédito, mas é uma contribuição para preencher a citada lacuna, normalmente não existente em países consolidados tecnologicamente. Este é mais um equipamento de uma vasta lista, na qual se pode observar que muitos deles se tornaram bens tecnológicos brasileiros de utilização em várias empresas e instituições. Sob determinada ótica de observação a universidade não deveria se preocupar com o desenvolvimento de equipamentos para a fabricação metal-mecânica, sob a alegação de que isto foge ao seu objetivo. É exatamente contrário a este tipo de visão, que o LABSOLDA se posiciona. A fundamentação desta posição é ancorada no fato de que um real avanço científico e tecnológico não pode ficar atrelado às limitações de equipamentos comerciais. Assim, o LABSOLDA não desenvolveu fontes de soldagem para serem simplesmente modelos adicionais aos do mercado, mas sim para somar características não disponíveis em outros equipamentos ou para proporcionar desenvolvimentos complementares, como é o caso deste sistema orbital. Ele utilizou a fonte de soldagem Larry Flex, um desenvolvimento que facilitou a concretização deste trabalho.

Além destas questões de ordem conjuntural em que um desenvolvimento conduz a outro em uma cadeia virtuosa, existe o fato de que em certos nichos de tecnologia, os equipamentos disponíveis no mercado são restritos a poucas empresas e, por isso, são pouco popularizados. Em conseqüência, seus custos são também muito

altos. Frequentemente, o custo de um desenvolvimento é mais baixo do que o custo de um equipamento comercial. Adicionalmente, existe ainda a tendência de que as partes integrantes dos equipamentos comerciais não possuam interfaces flexíveis para associações com equipamentos já disponíveis.

Todas as características citadas aqui constituem razões e conclusões do desenvolvimento apresentado nesta dissertação. Embora, não se trate de algo inédito, como já mencionado, ele tem sentido em um contexto amplo, como o de tornar versáteis laboratórios de soldagem a custos extremamente mais baixos que a simples aquisição de equipamentos comerciais.

Além de todas as razões citadas, o contexto com que um equipamento deste é realizado possibilita o exercício real de treinamento de recursos humanos. No presente caso houve o treinamento de alunos de engenharia mecânica, um aluno de formação técnica e de três de formação pós-graduada.

CAPÍTULO 8

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho resultou numa grande quantidade de informações sobre diferentes aspectos relacionados à soldagem. Isto permitiu abrir novas perspectivas de trabalhos e questões a serem analisadas com maior profundidade, a saber:

- Com o intuito de atender a tubos com maiores diâmetros e espessuras de parede, e assim aumentar a gama de aplicações do equipamento, desenvolver outros modelos de cabeçotes TIG orbitais, como o que câmara aberta;
- Integrar num único componente do sistema a unidade de controle, a fonte de soldagem e o controle de comando remoto (IHM), com o objetivo de diminuir o número de conexões e aumentar a portabilidade do equipamento;
- Substituir a fonte de soldagem empregada (CC) por uma que possibilite a soldagem em corrente alternada, e assim possibilitar a soldagem de tubos de alumínio;
- Reprojetar o conjunto posicionador do cabeçote orbital com o intuito de reduzir sua massa e assim tornar o equipamento mais versátil e ergonômico;
- Com base nos resultados teóricos (Equação de Rykalin e Adams) e experimentais, conceber um modelo matemático que prediga o novo valor da corrente de pulso a ser empregado na realização do cordão de solda e assim reduzir o tempo necessário para determinar o conjunto de parâmetros TIG pulsado;
- Determinar a relação entre o tempo e a amplitude da corrente com a geometria do ponto de solda, algo como $I_p^n * t^m = K$;
- Diante das controversas existentes entre os fabricantes de equipamentos de soldagem orbital e a literatura, verificar a real necessidade de dividir os tubos em seções na soldagem de tubos com pequenos diâmetros, uma vez que para tubos de diâmetro de 76,2 mm essa divisão não se mostrou necessária;
- Comparar a robustez da soldagem com corrente contínua pulsada frente à contínua constante no caso da soldagem de tubos com pequenos diâmetros por se tratar de uma soldagem crítica devido aos efeitos térmicos neste caso ser mais pronunciados;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **MANNION, B.** *The fundamentals of orbital welding.* USA : Welding Design and Fabrication, Feb. 1999. pp. 22-24,26-27. Vol. 72.
2. **metal-shaper.** <http://www.metal-shaper.com/tig-welding-history-theory-gtaw>. [Online] 30 de 09 de 2008.
3. **Gerken, J. M.** *Gas tungsten arc welding.* s.l. : The Lincoln electric company, 1995.
4. **Kou, S.** *Welding Metalurgy.* 2ª ed. New Jersey : Wiley-Interscience publication, 2003.
5. **Lancaster, J. F.** *The Physics of welding.* Ireland : Physics technologic, 1984. pp. 73-79. Vol. 15.
6. **MARQUES, P.V., MODENESI, P.J. e BRACARENSE, A.Q.** *Soldagem: Fundamentos e Tecnologia.* Belo Horizonte : Ed. UFMG, 2005. p. 362.
7. **MODENESI, P. J.** *Introdução À Física do Arco Elétrico E A Sua Aplicação Na Soldagem dos Metais.* Belo Horizonte : s.n., Jun. 2002.
8. **Handbook, Welding.** *Welding Science and Technology.* 9ª ed. s.l. : AWS, 2001. Vol. 1.
9. **DURGUTLU, A.** *Experimental Investigation of The Effect of Hydrogen in Argon as a Shielding Gas on TIG Welding of Austenitic Stainless Steel.* s.l. : Materials and Design, 2004. pp. 19–23. Vol. 25.
10. **GOHR Jr, R.** *Novos Métodos de Controle da Soldagem MIG/MAG.* Florianópolis : Tese de doutorado. Dept. de Eng. Mecânica, UFSC, Set. 2002.
11. **Street, J. A.** *Pulsed arc welding.* 1ª. s.l. : Abington publishing, 1990.
12. **Handbook, Welding.** 8ª Ed. s.l. : AWS, 1991. Vol. 2.
13. **Mannion, B., Heinzman, J.** *Orbital tube welding.* USA : Flow Control, Dec. 1999.
14. **Henon, Barbara K.** *Practical Applications of Orbital Tube and Pipe Welding.* <http://www.arcmachines.com/appPages/pract02.html>. [Online] [Citado em: 02 de agosto de 2008.]
15. **PURNELL, S.** *Assessing developments in orbital welding. Part I: Taking The Monotony Out Of Tube Welding.* USA : Tube & Pipe Journal, Set. 2002. pp. 26-29. Vol. 13.

16. **Mannion, B., Heinzman, J.** *Setting up and determining parameters for orbital tube welding*. USA : The Fabricator, May. 1999. Vol. 29.
17. **PURNELL, S.** *Orbital welding developments*. s.l. : Welding and Cutting, Mar. 2004. pp. 150-152. Vol. 56.
18. **LABSOLDA.** http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/projetos_atuais/sistema_soldagem_orbital.php. [Online] [Citado em: 20 de agosto de 2008.]
19. **ORBIMATIC.** http://www.genta-muh.com/e_orbiweld_tp.htm. [Online] [Citado em: 2008 de julho de 25.]
20. **ARIMA, G., DUTRA, J. C.** *Desenvolvimento de um cabeçote orbital para a soldagem TIG de tubos*. UFSC, Florianópolis : Relatório técnico. Dept. de Eng. Mecânica, 2002.
21. **ARIMA, G., DUTRA, J. C.** *Desenvolvimento de um cabeçote orbital para a soldagem TIG de tubos*. Rio de Janeiro : Boletim técnico da Petrobras, Jan/Jun 2003. pp. 38-55.
22. **BORTOLINI, J. R., DUTRA, J. C.** *Desenvolvimento de um cabeçote orbital para a soldagem TIG de tubos*. UFSC, Florianópolis : Relatório técnico. Dept. de Eng. Mecânica, 2003.
23. **BROERING, C. E.** *Desenvolvimento de Sistemas para a Automação da Soldagem e do Corte Térmico*. Florianópolis : Dissertação de mestrado. Dept. de Eng. Mecânica, Fev. 2005. p. 96.
24. **LABSOLDA.** http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/projetos_viabilizados/mte.php. [Online] 26 de 09 de 2008.
25. **CUNHA, T.V. DUTRA, J. C.** *Sistema para automação da soldagem de tubos na indústria petroquímica*. s.l. : Petro & Quimica, 2007. pp. 56-66. Vol. 298.
26. **Filho, R. P. D. A.** <http://www2.eletronica.org/artigos/eletronica-digital/protocolo-de-comunicacao-i2c>. [Online] 29 de 09 de 2008.
27. **LABSOLDA.** http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/projetos_viabilizados/mva_2.php. [Online] 26 de 09 de 2008.
28. —. http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/projetos_viabilizados/larry_flex.php. [Online] 26 de 09 de 2008.
29. —. http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/projetos_viabilizados/tartilope_v1.php. [Online] 26 de 09 de 2008.
30. **Emmerson, J. G.** *Recent developments in orbital-welding equipment*. USA : Welding Design and Fabrication, Apr. 1997. pp. 32-36. Vol. 70.

31. **LABSOLDA.** http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/projetos_viabilizados/sap_1.php. [Online] 26 de 09 de 2008.
32. **R. Zelenovsky, A. Mendonça.** *PC: um guia prático de hardware e interfaceamento*. 3ª. Rio de Janeiro : MZ, 2002.
33. **Silva Junior, V. P.** *Aplicações práticas do microcontrolador 8051*. São Paulo : Érica, 1990.
34. **Nicolosi, D. E. C.** *Microcontrolador 8051 detalhado*. 2ª. São Paulo : Érica, 2001.
35. **LABSOLDA.** http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/projetos_viabilizados/minitec.php. [Online] 29 de 09 de 2008.
36. —. http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/projetos_viabilizados/interdata_2.php. [Online] 29 de 09 de 2008.
37. **Machado, I. G.** *Condução do calor na soldagem: Fundamentos & Aplicações*. 1ª. Porto Alegre : Ed. Imprensa livre, 2000.