

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

**DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DA SOLDAGEM PLASMA PELA TÉCNICA  
KEYHOLE**

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

**ÓDER SILVA DE PAULA JÚNIOR**

**FLORIANÓPOLIS, ABRIL DE 1997**

**DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DA SOLDAGEM PLASMA PELA  
TÉCNICA KEYHOLE**

**ÓDER SILVA DE PAULA JÚNIOR**

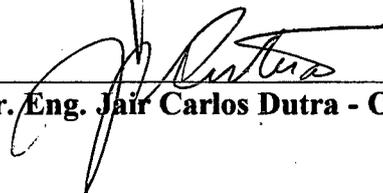
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

**MESTRE EM ENGENHARIA**

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



**Prof. PhD. Abelardo A. de Queiroz - Coord. do Curso**

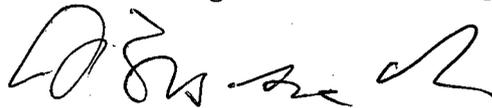


**Prof. Dr. Eng. Jair Carlos Dutra - Orientador**

**BANCA EXAMINADORA**



**Prof. Dr. Eng. Almir Monteiro Quites**



**Prof. Dr. Eng. Augusto J. de Almeida Buschinelli**



**Prof. Dr. Eng. Valtair Antônio Ferraresi**

**À Deus, aos meus pais: Óder e Ivone,  
à minha irmã: Paula, aos meus avós:  
Deoclécio e Ana**

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Jair Carlos Dutra, pela orientação, estímulo e companheirismo;

Aos professores Gérson Corrêa e Jorge Yamana do ICMG pelo incentivo e apoio para inscrição no mestrado;

Aos Eng<sup>os</sup> Larry Fiori Ollé, Raul Gohr Jr e Cleide Marqueze, além dos técnicos Valério Quadros e Jean Alves, pelo valioso apoio e colaboração durante a fase de preparação e realização dos experimentos;

Ao Prof. Carlos Niño pelo grande apoio, pelas consultas e esclarecimentos de dúvidas;

Aos professores do Curso de Pós-Graduação em Eng. Mecânica, pelo convívio e ensinamentos transmitidos;

Ao CNPq pela bolsa de estudo concedida;

Aos bolsistas Agnelo Goetz, Élbio Geraldo, Amílton Vieira, Fabrício Freire, e os estagiários Carlos Porfirio e Wiliam Comicholli, que auxiliaram na preparação dos corpos de prova e ensaios metalográficos;

Ao bolsista Moisés Oliveira, que realizou a editoração gráfica da maior parte das figuras deste trabalho;

À toda a turma do LABSOLDA e CPGEM, em especial aos amigos Luis Galaz, Leonardo Bocannera, Carlos Baixo, Sérgio Barra, Luis Cáceres, Ramón Cortês, Ossimar Maranhão, Rodrigo Zeilmann, Flávia Modesto, Lizângela de Conto, Pedro Fiad, Augusto Ribeiro, Danielle Bond e Marcelo Vandresen pela amizade e pelos momentos de descontração;

Aos meus amigos mineiros do curso de Pós-Graduação em Eng. Elétrica: Rosi, Afonso e Nardênio, pelo convívio e momentos de descontração que irão deixar saudades;

À toda minha família, com um carinho especial à minha mãe, que incansavelmente dividiu comigo todos os momentos desta caminhada e que nos momentos difíceis tinha sempre aquela palavra que inspirava ânimo e coragem.

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	x
SIMBOLOGIA.....	xiii
RESUMO.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
I - INTRODUÇÃO.....	1
II - OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS.....	2
III - O PROCESSO PLASMA.....	3
3.1 - Histórico.....	3
3.2 - O Arco Plasma.....	5
3.3 - Parâmetros e Variáveis do Processo.....	8
3.4 - Variantes do Processo.....	9
3.4.1 - Plasma MIG/MAG.....	9
3.4.2 - Plasma-TIG.....	11
3.4.3 - Pulverização Térmica por Plasma.....	12
3.4.4 - Brasagem por Plasma.....	14
3.4.5 - Micro-plasma.....	14
3.4.6 - Corte por Plasma.....	15
3.5 - Precauções e Segurança.....	15
3.5.1 - Ruído.....	16
3.5.2 - Fumos.....	16
3.5.3 - Radiação.....	17

3.5.4 - Gases.....	17
<b>IV - SOLDAGEM PLASMA.....</b>	<b>18</b>
4.1 - Introdução.....	18
4.1.1 - O Processo.....	18
4.1.2 - Tipos de Correntes de Soldagem e suas Aplicações.....	22
4.1.3 - Equipamentos.....	25
a - Fontes de Energia.....	25
b - Tochas de Soldagem.....	26
c - Console de Controle do Arco Plasma.....	29
4.1.4 - Gases Utilizados no Processo.....	30
a - Gás de Plasma.....	30
b - Gás de Proteção.....	32
4.1.5 - Material de Base.....	35
4.1.6 - Material de Enchimento.....	36
4.1.7 - A Preparação da Junta para Soldagem Plasma.....	37
4.1.8 - Modos de Soldagem.....	39
a - Melt-in.....	39
b - Técnica Keyhole.....	40
4.1.9 - Aplicações da Soldagem Plasma.....	44
a - Soldagem de Tubos.....	45
b - Aplicações na Indústria Aeroespacial e Automotiva.....	45
c - Componentes Nucleares e Vasos de Pressão.....	46
4.1.10 - Controle de Qualidade da Solda.....	46
<b>V - MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>48</b>
5.1 - Introdução.....	48

5.2 - Equipamentos.....	49
5.2.1 - Central de Soldagem Inversal 300.....	49
5.2.2 - Módulo Plasma.....	50
5.2.3 - Medidores de Vazão de Gás.....	51
5.2.4 - Sistema de Deslocamento da Tocha de Soldagem.....	51
5.2.5 - “Softwares”.....	52
5.2.6 - INTERDATA 2.....	52
5.2.7 - Tocha de Soldagem Plasma.....	52
5.3 - Materiais Empregados.....	53
5.3.1 - Material de Base.....	53
5.3.2 - Eletrodo e Bocal Constritor.....	54
5.3.3 - Gases.....	55
5.4 - Procedimento Experimental.....	55
5.4.1 - Procedimento Geral de Soldagem.....	55
5.4.2 - Procedimentos Específicos e Dados de Soldagem.....	57
VI - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	68
6.1 - Levantamento da Repetibilidade dos Resultados.....	68
6.2 - Influência da Distância Tocha-peça.....	71
6.3 - Influência da Vazão do Gás de Proteção.....	74
6.4 - Influência da Vazão do Gás de Plasma.....	77
6.5 - Influência do ângulo do Eletrodo.....	80
6.6 - Levantamento da área de Trabalho de Variáveis e Parâmetros.....	82
6.7 - O Efeito do Gás de Proteção na Raiz da Solda (backing gas).....	84
6.8 - Passe de Raiz em Chapas Espessas com Chanfro em V.....	87
6.9 - Ensaio Mecânico e Radiográfico.....	90
6.10 - Corrente Pulsada.....	93
6.11 - Soldagem na Posição Vertical.....	97

VII - CONCLUSÕES.....	103
VIII - PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	105
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	107

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Seleção do eletrodo e ângulo de ponta em função da corrente máxima empregada na soldagem plasma.....	29
Tabela 2 -	Seleção de gases a serem utilizados na soldagem plasma. Gás de plasma.....	32
Tabela 3 -	Seleção dos gases de proteção para soldagem plasma. O gás de plasma é o Ar em todos os casos.....	34
Tabela 4 -	Dados técnicos da Central de Soldagem INVERSAL 300.....	50
Tabela 5 -	Condições de soldagem levantadas e adotadas para a realização dos experimentos.	60
Tabela 6 -	Condições de soldagem estabelecidas e adotadas para análise do efeito do gás de proteção na raiz da solda.....	61
Tabela 7 -	Condições de soldagem estabelecidas e adotadas para experimentos utilizando a corrente pulsada na posição plana e vertical e corrente constante na posição vertical.....	66
Tabela 8 -	Dados levantados e calculados em relação ao reforço na raiz.....	69
Tabela 9 -	Dados levantados e calculados em relação a largura da solda.....	70
Tabela 10 -	Dados levantados e calculados em relação ao reforço na raiz para análise do efeito do ângulo do eletrodo sobre a solda.....	81
Tabela 11 -	Dados levantados e calculados em relação a largura da solda para análise do efeito do ângulo do eletrodo sobre a solda.....	81
Tabela 12 -	Dados calculados para aplicação do teste F na análise da influência do ângulo do eletrodo.....	82

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Plasma com arco não-transferido (a) e transferido (b)	8
Figura 2 - Representação esquemática do processo plasma-MIG/MAG	11
Figura 3 - Comparação entre os processos TIG e Plasma	19
Figura 4 - Tocha plasma mostrando algumas variáveis secundárias de controle para soldagem	20
Figura 5 - Efeito da constrição do arco sobre a temperatura e tensão	21
Figura 6 - Relação entre os tempos e amplitudes de corrente para algumas ligas de alumínio (6,35 mm)	24
Figura 7 - Detalhe da tocha de soldagem plasma para operação automatizada	27
Figura 8 - Esquema da proteção no reverso utilizada na soldagem plasma pela técnica keyhole	35
Figura 9 - Taxas de deposição para soldagem com adição de material. Arame quente com e sem oscilação, e arame frio	37
Figura 10 - Tipos e configurações de junta mais indicadas para soldagem plasma	38
Figura 11 - Representação típica da soldagem plasma pela técnica keyhole	40
Figura 12 - Velocidades de soldagem para os diferentes processos (solda de topo)	44
Figura 13 - Bancada de ensaios para soldagem plasma	53
Figura 14 - Detalhe do bocal e eletrodo utilizados nos experimentos	54
Figura 15 - Localização dos corpos de prova para ensaio mecânico na junta soldada	64
Figura 16 - Corpo de prova de dobramento	65
Figura 17 - Posicionamento do SDP e dos CP's para soldagem na posição vertical	67
Figura 18 - Macrografia da solda utilizando uma DTP de 2,0 mm	72
Figura 19 - Macrografia da solda utilizando uma DTP de 4,0 mm	72
Figura 20 - Macrografia da solda utilizando uma DTP de 6,0 mm	73
Figura 21 - Macrografia da solda utilizando uma DTP de 8,0 mm	73
Figura 22 - Macrografia da solda utilizando uma DTP de 10,0 mm	74
Figura 23 - Aspecto visual da solda. Gás de proteção: argônio a 4,0 l/min	75
Figura 24 - Aspecto visual da solda. Gás de proteção: argônio a 6,0 l/min	75

Figura 25 - Aspecto visual da solda. Gás de proteção: argônio a 8,0 l/min	76
Figura 26 - Aspecto visual da solda. Gás de proteção: argônio a 10,0 l/min	76
Figura 27 - Aspecto visual da solda. Gás de proteção: argônio a 12,0 l/min	77
Figura 28 - Aspecto visual da solda. Gás de plasma: argônio a 0,8 l/min	78
Figura 29 - Aspecto visual da solda. Gás de plasma: argônio a 1,2 l/min	78
Figura 30 - Aspecto visual da solda. Gás de plasma: argônio a 1,7 l/min	79
Figura 31 - Aspecto visual da solda. Gás de plasma: argônio a 2,2 l/min	79
Figura 32 - Área de trabalho da velocidade e corrente de soldagem ( $e=4,8$ mm)	83
Figura 33 - Área de trabalho da velocidade e corrente de soldagem ( $e=6,35$ mm)	84
Figura 34 - Aspecto da raiz da solda. Aço ABNT 1020 de 6,35 mm. Sem proteção no reverso	85
Figura 35 - Aspecto da raiz da solda. Aço ABNT 1020 de 6,35 mm. Com proteção no reverso	85
Figura 36 - Aspecto da raiz da solda. Aço AISI 304 de 4,8 mm. Sem proteção no reverso. Ampliação 10x	86
Figura 37 - Aspecto da raiz da solda. Aço 4340 de 4,0 mm. Com proteção no reverso	86
Figura 38 - Aspecto visual do corpo de prova soldado. Aço ABNT 1020 de 10 mm, chanfro em V. O primeiro passe de raiz e o passe posterior de enchimento	88
Figura 39 - Aspecto da raiz da solda. Aço ABNT 1020 de 10,0 mm, chanfro em V	88
Figura 40 - Aspecto visual do corpo de prova soldado. Aço ABNT 1020 de 25,4 mm chanfro em V. Detalhe superficial da raiz	89
Figura 41 - Aspecto da raiz da solda. Aço ABNT 1020 de 25,4 mm, chanfro em V	89
Figura 42 - Macrografia da solda do corpo de prova de 10,0 mm, chanfro em V. Ataque com nital a 5%. Ampliação: 10X	90
Figura 43 - Forma descrita pela vazão do gás de plasma durante o controle	92
Figura 44 - Soldas para análise da influência do controle da vazão do gás de plasma. Aspecto superficial	92
Figura 45 - Aspecto superficial do corpo de prova soldado. Aço ABNT 1020 de 6,35 mm. Corrente pulsada	95

Figura 46 - Aspecto superficial da raiz da solda. Aço ABNT 1020 de 6,35 mm. Corrente pulsada	95
Figura 47 - Aspecto superficial do corpo de prova soldado. Aço ABNT 1020 de 4,8 mm. Corrente pulsada	96
Figura 48 - Aspecto superficial da raiz da solda. Aço ABNT 1020 de 4,8 mm. Corrente pulsada	96
Figura 49 - Aspecto superficial da solda. Aço ABNT 1020 de 3,2 mm de espessura. Posição vertical descendente. Corrente constante	99
Figura 50 - Aspecto da raiz da solda. Aço ABNT 1020 de 3,2 mm de espessura. Posição vertical descendente. Corrente constante	99
Figura 51 - Aspecto superficial da solda. Aço ABNT 1020 de 3,2 mm de espessura. Posição vertical descendente. Corrente pulsada	100
Figura 52 - Aspecto da raiz da solda. Aço ABNT 1020 de 3,2 mm de espessura. Posição vertical descendente. Corrente pulsada	100
Figura 53 - Aspecto superficial da solda. Aço ABNT 1020 de 6,35 mm de espessura. Posição vertical descendente. Corrente pulsada	101
Figura 54 - Aspecto da raiz da solda. Aço ABNT 1020 de 6,35 mm de espessura. Posição vertical descendente. Corrente pulsada	101
Figura 55 - Aspecto superficial da solda. Aço ABNT 1020 de 6,35 mm de espessura. Posição vertical ascendente. Corrente pulsada	102
Figura 56 - Aspecto da raiz da solda. Aço ABNT 1020 de 6,35 mm de espessura. Posição vertical ascendente. Corrente pulsada	102

## SIMBOLOGIA

"	⇒	Polegada (25,4 mm)
$\alpha$	⇒	Ângulo da ponta do eletrodo
$\phi$	⇒	Diâmetro do eletrodo
$\bar{x}$	⇒	Média dos valores de reforço na raiz e largura da solda
$\sigma$	⇒	Desvio padrão dos valores de reforço na raiz e largura da solda
$\bar{x}_t$	⇒	Média total
1G	⇒	Posição plana
%	⇒	Porcentagem
°	⇒	Grau
°C	⇒	Grau Celsius
A	⇒	Ampère
ABNT	⇒	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	⇒	"American Iron and Steel Institute"
Al	⇒	Alumínio
ANSI	⇒	"American National Standards Institute"
<u>apud</u>	⇒	Citado por, conforme, segundo
Ar	⇒	Argônio
ASME	⇒	"American Society of Mechanical Engineers"
atm	⇒	Atmosfera
AWS	⇒	"American Welding Society"
C	⇒	Carbono
CA	⇒	Corrente alternada
CC	⇒	Corrente contínua
CC+	⇒	Corrente contínua com polaridade inversa

CC-	⇒	Corrente contínua com polaridade direta
Co	⇒	Cobalto
cm	⇒	Centímetro ( $10^{-2}$ m)
CO <sub>2</sub>	⇒	Dióxido de carbono
CP	⇒	Corpo de prova
CTA1	⇒	Programa de controle da vazão do gás de plasma
DCP	⇒	Distância contato-peça
DTP	⇒	Distância tocha-peça
e	⇒	Espessura
ed.	⇒	Edição
et al.	⇒	Et alli (entre outros)
EUA	⇒	“Uniteds States of America”
eV	⇒	Elétron volt
Fe	⇒	Ferro
FP	⇒	Fonte de potência para abertura do arco piloto
H <sub>2</sub>	⇒	Hidrogênio (gás)
He	⇒	Hélio
I	⇒	Corrente elétrica
Ib	⇒	Corrente de base
IGBT	⇒	“Insulated Gate Bipolar Transistor”
INTERDATA 2	⇒	Placa de aquisição de dados
INVERSAL 300	⇒	Central de Soldagem Multiprocesso
Ip	⇒	Corrente de pulso
kg/h	⇒	Quilograma por hora
kJ	⇒	Quilo joule ( $10^3$ J)
kW	⇒	Quilo watts
l	⇒	Litros
LABSOLDA	⇒	Laboratório de Soldagem e Mecatrônica

m	⇒	Metro
MAG	⇒	“Metal Active Gas”
MIG	⇒	“Metal Inert Gas”
min	⇒	Minuto (60 s)
MMA	⇒	“Manual Metal Arc Welding”
mm	⇒	Milímetro ( $10^{-3}$ m)
Mn	⇒	Manganês
MnO	⇒	Óxido de manganês
MnS	⇒	Sulfeto de manganês
MnSiO	⇒	Óxido de silício manganês
ms	⇒	Milisegundo ( $10^{-3}$ s)
MVG	⇒	Medidor de Vazão de Gás
N <sub>2</sub>	⇒	Nitrogênio (gás)
Ni	⇒	Niquel
O <sub>2</sub>	⇒	Oxigênio (gás)
PAC	⇒	“Plasma Arc Cutting”
PAW	⇒	“Plasma Arc Welding”
PWM-300	⇒	Modelo da tocha de soldagem utilizada nos experimentos
RAM	⇒	“Read Access Memory”
s	⇒	segundo
SAE	⇒	“Society American of Engineers”
SDP-600	⇒	Sistema de Deslocamento Computadorizado da Tocha
Si	⇒	Silício
T	⇒	Temperatura
tb	⇒	Tempo de base
tp	⇒	Tempo de pulso
Ti	⇒	Titânio
TIG	⇒	“Tungsten Inert Gas”

Th	⇒	Tório
U	⇒	Tensão
Ua	⇒	Queda de potencial anódica
Ub	⇒	Queda de potencial na região constrigida
Uc	⇒	Queda de potencial catódica
Ud	⇒	Queda de potencial após a constrição
Up	⇒	Queda de potencial na região de pré-constrrição
UFSC	⇒	Universidade Federal de Santa Catarina
V	⇒	Volt
Va	⇒	Velocidade de alimentação do arame-eletrodo
VGP	⇒	Vazão do gás de plasma
VGPr	⇒	Vazão do gás de proteção
VGPu	⇒	Vazão do gás de purga
Vs	⇒	Velocidade de soldagem
ZAC	⇒	Zona Termicamente Afetada

## RESUMO

No escopo deste trabalho apresenta-se uma investigação relacionada a soldagem plasma pela técnica keyhole, destacando-se alguns aspectos operacionais e metalúrgicos inerentes ao processo. Utilizou-se como material de base na maioria dos experimentos o aço ABNT 1020. Também foram realizados alguns experimentos com os aços AISI 304 e SAE 4340. O estudo foi realizado num banco de ensaios automatizado, baseando-se na observação do aspecto visual das soldas, análises metalográficas e medições de largura e reforço na raiz das soldas efetuadas. Embora a maioria dos experimentos tenha sido realizada na posição plana, foram efetuados alguns experimentos na posição vertical. Nesta investigação utilizou-se a corrente contínua constante e a corrente pulsada. Sob o ponto de vista operacional procurou-se levantar a repetibilidade dos resultados e estabelecer um procedimento de soldagem para os materiais de base empregados. Quanto aos aspectos metalúrgicos, apresentam-se resultados dos ensaios de dobramento transversal de face e de raiz, ensaio radiográfico, análises metalográficas, e um estudo da influência de alguns parâmetros/variáveis de soldagem sobre o surgimento de defeitos, tais como: porosidades, trincas e não ocorrência de penetração total; o que caracteriza a não ocorrência do keyhole. Os resultados dos ensaios de dobramento foram muito bons, assim como do ensaio radiográfico, mostrando que com um adequado conjunto de parâmetros/variáveis a soldagem plasma pela técnica keyhole apresenta soldas limpas, ou seja, isenta de falhas.

## ABSTRACT

This work deals with plasma welding process using keyhole technique, with emphasis on operational and metallurgical aspects inherent to the process. As base metal it was used SAE 1020 steel in the vast majority of the experiments, and some were done using AISI 304 and SAE 4340 steels. For the experiments it was used an automated test system, and the resultant welds were analyzed by visual examination, metallography and measurement of weld width and root reinforcement. The most of the welds were made in the flat position, and some of them in the vertical position. The current was almost always of the constant type, but it was also explored the use of pulsed current. From an operational point of view it was verified the repeatability of results and were established welding procedures for different materials types and thicknesses. With respect to the metallurgical aspects, there are showed the results of weld root and face bending tests, radiographic tests, metallographic analysis, and conclusions about the influence of some parameters and variables on weld defects like porosity, cracks and lack of penetration, this last characterizing a fault of keyhole occurrence. The results of bending and radiographic tests were excellent, demonstrating that with an adequate selection of parameters and variables the plasma keyhole results in defect free and sound welds.

## INTRODUÇÃO

Com a crescente utilização de novos materiais, bem como com o aumento das exigências de qualidade associadas à necessidade emergente de melhorar a produtividade e flexibilização dos processos de fabricação, assiste-se cada vez mais à busca de otimização e desenvolvimentos de novas tecnologias e processos que venham a atender estas exigências. No âmbito desta busca encontra-se o processo de soldagem plasma que, embora tenha sido inventado há mais de 40 anos, ainda é considerado um processo avançado de soldagem, devido não só aos desenvolvimentos relativamente recentes, bem como à sua utilização limitada a aplicações relativamente nobres [1].

A introdução do plasma pulsado nos últimos anos generalizou a utilização deste processo a várias outras aplicações, tal como, a soldagem de tubos em todas as posições [2, 3]. Outra contribuição para o avanço no campo de aplicações foi a utilização da corrente alternada, que foi desenvolvida basicamente para ser utilizada na soldagem do alumínio e suas ligas, sendo atualmente utilizado o arco plasma nestes tipos de aplicações especialmente na indústria aeroespacial [4, 5].

Estudos posteriores a estes novos conhecimentos permitiram que se observassem as vantagens oferecidas pela soldagem plasma em aspectos como a velocidade comparativamente, por exemplo, à soldagem MIG nomeadamente no que se refere à profundidade de penetração, a qual é apenas limitada pela impossibilidade da tensão superficial sustentar qualquer dimensão da coluna de metal líquido durante a soldagem. A qualidade da solda, bem como as suas velocidades elevadas comparativamente às do TIG também tornaram a soldagem plasma um processo altamente competitivo em relação a este último [3, 6].

Estas considerações evidenciam cada vez mais as vantagens e qualidades da soldagem plasma em relação aos demais processos de soldagem em determinadas aplicações, o que estimula e conduz cada vez mais a novos estudos e investigações que visam fornecer uma melhor caracterização do processo.

## II

### OBJETIVO E JUSTIFICATIVAS

Buscou-se no escopo deste trabalho proceder a montagem de uma bancada para soldagem plasma utilizando equipamentos desenvolvidos com tecnologia nacional, e deste modo fornecer maiores informações e dados à respeito da soldagem plasma pela técnica keyhole, especialmente no que concerne ao estabelecimento do melhor conjunto de parâmetros/variáveis de soldagem para se obter soldas de qualidade, trabalhando-se com distintos materiais de base em diferentes espessuras.

O objetivo principal foi contribuir para a caracterização da soldagem plasma, haja visto que poucas informações tecnológicas concernentes à aspectos operacionais e metalúrgicos se encontram disponíveis na literatura pesquisada o que motivou ainda mais a realização deste trabalho. De certa forma esta carência de informações contribui inclusive para a insuficiente utilização do processo industrial. Buscou-se também o conhecimento estruturado e direcionado à realidade nacional, fomentando o máximo esforço para evitar a necessidade de importação de equipamentos.

Optou-se por trabalhar com a técnica keyhole em detrimento ao modo convencional porque está técnica é referenciada como capaz de proporcionar elevados ganhos de produtividade e por apresentar uma solda de muito boa qualidade, podendo-se destacar, por exemplo, as mínimas distorções e a menor zona termicamente afetada, o que é muito desejável em termos de características da solda. Aliada a estes resultados, encontra-se a possibilidade de se obter uma penetração total da solda em um único passe em materiais relativamente espessos e sem a necessidade de preparar a junta com chanfro.

Acredita-se assim, que há muito o que contribuir para o desenvolvimento e implementação da soldagem plasma pela técnica keyhole e, para tanto, é necessário que se comece a desenvolver trabalhos para realmente avaliar as potencialidades do processo.

### III

## O PROCESSO PLASMA

### 3.1 - Histórico

Os primeiros trabalhos exploratórios que se constituíram numa referência inicial para o surgimento e desenvolvimento do processo de soldagem e corte a arco plasma foram introduzidos na primeira década deste século. Em 1909, Schonherr desenvolveu um sistema a arco plasma denominado vórtice de gás estabilizado. Neste sistema, o gás era soprado tangencialmente para dentro de um tubo, de forma contínua, onde se processava o acendimento do arco. Eram produzidos arcos de diferentes comprimentos e o sistema foi de grande utilidade para estudos do comportamento do arco [7]. Em 1911, E. Mathers apud [8], descreveu o uso do plasma como fonte de calor. Em 1922, Gardien e Lotz apud [7] desenvolveram um sistema que utilizava água para estabilização do arco. A água era injetada tangencialmente no interior de um tubo, que era rotacionado. O arco ao ser estabelecido no interior do tubo entre um eletrodo de carbono e a presença de água, permitia que fossem obtidas elevadas temperaturas e densidades de corrente. Este sistema não teve aplicações práticas em trabalhos com metais devido ao rápido desgaste do eletrodo de carbono e a presença de hidrogênio e oxigênio no jato de plasma.

Durante uma operação de fusão a arco de materiais refratários, em 1953, Robert Gage apud [7] observou a similaridade aparente entre o arco elétrico e uma chama de gás. Esforços no sentido de se controlar a intensidade do calor e a velocidade do arco plasma permitiram o avanço na direção de desenvolvimentos das modernas tochas de arco plasma.

Na década de 50, a Union Carbide Corporation através de seus pesquisadores promoveu intensas pesquisas para o desenvolvimento do processo a arco plasma [8]. Neste período, operações de corte de material foram realizadas utilizando-se o processo TIG, com pequenas modificações na saída do bocal de gás, que permitiram um aumento considerável na vazão e temperatura do gás aquecido, utilizando-se ainda um circuito suplementar para iniciação do arco, através de um arco piloto. A elevada velocidade do jato de gás aquecido que incidia sobre a poça fundida formada sobre

a superfície da peça, promovia o corte do material. Este foi o primeiro trabalho de corte de material utilizando o arco plasma. Deste modo, foi lançado no mercado em 1957, por intermédio da Linde Union Carbide, o primeiro processo a arco plasma para operações de corte. Em 1962, James Browning patenteou um sistema a arco plasma de duplo fluxo. Um gás secundário, que servia para proteger a região de trabalho na peça-obra, fluía ao redor do bocal, partindo deste para a peça [8]. Esta inovação permitiu proteger a zona de corte, melhorar o sistema de resfriamento do bocal constritor, elevar a velocidade de corte e melhorar a qualidade do mesmo.

Em 1965 foi estudado o comportamento de resfriamento do bocal constritor, através da utilização da água, obtendo-se resultados satisfatórios, como o aumento da vida útil do bocal e melhorias na qualidade do corte [2]. Em 1968, Richard Couch apud [5] patenteou o corte a plasma com injeção de água, apresentando em seu invento melhorias nas condições de resfriamento do bocal e aumento da velocidade de corte. Os fabricantes buscaram destacar as vantagens evidentes do processo de corte por plasma, fato que se verifica nos dias atuais, onde se torna inevitável as comparações e o caráter competitivo deste processo em relação ao processo de corte a laser. As pesquisas e desenvolvimentos posteriores indicaram que a coluna de plasma poderia ser adaptada para aplicações de soldagem.

A base teórica da soldagem a arco plasma foi apresentada por Lancaster apud em 1966 [9]. O processo apresentava algumas semelhanças com a técnica de soldagem a laser, onde o “Keyhole” - soldagem a arco plasma pela técnica do “buraco da fechadura” - era possível, e sendo indicado para diferentes condições de corte, soldagens e inclusive operações de perfuração. Em meados de 1960, os Estados Unidos realizaram uma das primeiras grandes aplicações da soldagem plasma com polaridade direta, aplicando este processo na montagem do foguete Titan III-C [5]. No mesmo período, a Thermal Dynamics destacou o uso da corrente alternada para soldagem plasma de alumínio em espessuras de até 6,35 mm.

Em 1967, Sciaky Brothers apud [5] produziu a fonte de energia para operar com o processo TIG, corrente alternada e forma de onda retangular. Estes fatos constituíram-se em importantes contribuições para o desenvolvimento do processo de soldagem plasma. No final dos anos 60, B. Van Cleave, da companhia Boeing, combinando a fonte de energia de Sciaky com a técnica keyhole, implementou o processo plasma de corrente alternada. Entretanto, o comportamento e a descrição do arco durante a soldagem não foi completamente entendido, constituindo-se deste modo, objeto de

pesquisas para os anos posteriores. Em 1981, Allum apud [9] investigou o fluxo de gás na coluna do arco de soldagem TIG, que é um processo similar ao processo plasma, estabelecendo equações características com base nas forças gravitacionais e magnéticas. Do mesmo modo, em 1979, Lowke apud [9] havia calculado as propriedades de arcos verticais estabilizados por convecção natural, obtendo perfis de velocidade que estariam em boa conformidade com os experimentos. Kapadia e Dowden [9] mostraram que os campos de velocidade dos gases em arcos de soldagem são problemas relevantes no estudo teórico do arco plasma. Em 1994, eles estabeleceram um modelo matemático do arco de soldagem plasma, mostrando que muitas de suas características, como por exemplo, sua forma, são determinadas predominantemente pelas condições de balanço no interior do arco [9].

### 3.2 - O Arco Plasma

O termo plasma é associado ao quarto estado da matéria, sendo descrito como um gás eletricamente condutor neste estado. Basicamente ele é constituído por um gás parcialmente ou totalmente ionizado (inicialmente, o gás é composto de moléculas, que no estado de plasma, estarão decompostas em átomos. Estes por sua vez perderão elétrons, tornando-se íons). Essa característica permite que ele possa ser manipulado por campos elétricos e magnéticos. Para estar ionizado, o gás precisa receber energia. Usa-se normalmente eletricidade para fornecer a energia, sendo que essa energia permitirá não só a ionização do gás, mas seu aquecimento.

No plasma, tem-se a transformação desta energia elétrica em calor. Quanto mais calor o gás conseguir absorver e transportar para a peça fria, melhor. Define-se conteúdo específico de calor (entalpia), como o calor contido em uma unidade de volume ou massa do plasma.

$$I = C \cdot T \quad [J/g] \quad (1)$$

Onde: I = entalpia

C = calor específico em J/g°K

T = temperatura em °K

Quanto maior a entalpia, maior deve ser a energia aplicada ao arco, e maior a energia a ser transportada. Quanto maior a condutibilidade térmica, mais facilmente é transferida esta energia para a peça-obra.

Em tecnologia da soldagem, o termo ARCO PLASMA é empregado para descrever processos que utilizam um arco elétrico constrito, sendo basicamente uma extensão do arco de soldagem TIG. O arco plasma é utilizado para corte e união de ligas metálicas, sendo suas características de elevada temperatura e vazão proporcionadas pelo confinamento do gás inerte, denominado gás de plasma, em uma câmara onde se tem na saída um orifício constritor. O arco elétrico estabelecido aquece o gás no interior da câmara, tornando-o ionizado e por conseguinte, condutor de eletricidade. Este gás ionizado é definido como plasma. A constrição do arco aumenta muito a densidade de corrente, a intensidade do campo magnético e as forças de Lorentz, as quais agem ao longo da coluna do arco. São esses fatores que provocam a elevada temperatura do plasma, bem como sua rigidez. A constrição do arco permite que ocorra uma menor dissipação de energia ao longo da coluna do plasma, entregando à peça-obra uma maior energia. Temperaturas de 8000 a 30000°C [7, 10] são verificadas na parte central do jato de plasma, onde a condutividade térmica e a densidade das partículas ionizadas são elevadas. Entretanto, na periferia do jato de plasma o gradiente de temperatura é extremamente íngreme e a condutividade térmica é baixa.

No processo plasma podem ser produzidos dois tipos de arco. O arco não-transferido e o arco transferido.

No arco não-transferido (figura 1-a), o arco é estabelecido e mantido entre o eletrodo e o orifício constritor. O arco plasma é forçado através do orifício pelo gás de plasma. A peça não é integrante do circuito do arco e o calor é obtido unicamente pelo jato de plasma. Este modo é utilizado para corte e soldagem de peças não condutoras de eletricidade, materiais não metálicos como, cerâmicos e certos tipos de vidros; ou para aplicações onde é requerida baixa concentração de energia. É geralmente empregado para pulverização térmica - processo de recobrimento protetor de superfícies [11]. Se houver um fluxo insuficiente de gás através do orifício constritor ou corrente excessiva para dada geometria do bocal causando perturbações da camada de fluxo, ou se o bocal é tocado na peça, o mesmo pode ser danificado pelo fenômeno denominado duplo arco. O primeiro arco é do eletrodo para o bocal e o segundo é do bocal para a peça. O calor gerado nas manchas anódica e catódica, formados pelos dois arcos, causam danos nas partes do bocal.

No segundo modo (figura 1-b), a corrente do arco plasma circula do eletrodo, que se constitui no pólo negativo (cátodo), para a peça (anodo), a qual é parte integrante do circuito elétrico. O calor é obtido pela mancha anódica na peça, assim como pelo jato de plasma. O arco transferido apresenta a vantagem de uma maior densidade de energia, cordões com menor zona afetada pelo calor e pequenas distorções. É utilizado para processos de corte e soldagem que requerem elevada transferência de calor.

Pode-se caracterizar o potencial total do arco transferido em cinco regiões [12] apresentadas na figura 1-b, de forma que o potencial total do arco pode ser expresso por:

$$U = U_c + U_p + U_b + U_d + U_a \quad [V] \quad (2)$$

Sendo:

$U_c, U_a$  = quedas de potencial catódica e anódica, respectivamente [V]

$U_p, U_b, U_d$  = quedas de potencial nas regiões de pré-constricção, constrigida e após a constricção (coluna do arco), respectivamente [V]

Na região de constricção, o diâmetro da coluna do plasma é menor que aquele do orifício do bocal. Isto se deve à dissipação de calor proporcionada pelo bocal constritor, que é refrigerado por água. Além desta região o diâmetro aumenta até o jato de plasma encontrar a peça. No plasma não transferido não há a queda de potencial da coluna, pois o arco é formado entre o eletrodo e o bocal.

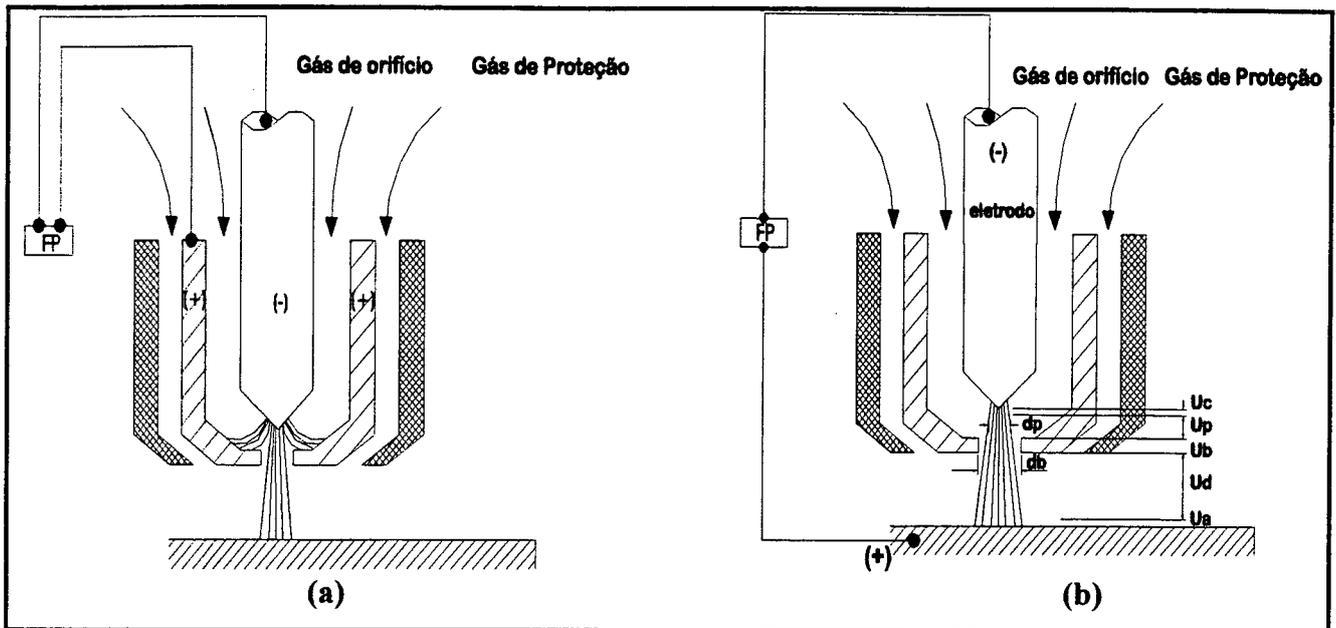


Figura 1 - Plasma com arco não transferido (a) e transferido (b) [12].

### 3.3 - Parâmetros e Variáveis do Processo

As propriedades do jato de plasma tais como, o grau de colimação do arco, a densidade de energia, e por consequência, a qualidade da operação de corte ou soldagem dependem de uma enorme gama de fatores, especialmente as características físicas e químicas do material a ser trabalhado, e dos parâmetros e variáveis empregados. Os fatores que mais influenciam no processo e que devem ser corretamente determinados e controlados são [7, 8, 13, 14]:

- A corrente
- O diâmetro e forma do orifício constritor do gás de plasma
- Tipo do gás de plasma
- Vazão do gás de plasma
- Tipo do gás de proteção
- Vazão do gás de proteção
- Velocidade de deslocamento da tocha

A faixa admissível para a variação destas grandezas, especialmente para se obter soldas de elevada qualidade, é restrita. Estes fatores podem ser ajustados para fornecer condições de operação em baixas ou elevadas densidades de energia. Martikainen e Moisisio [13], ressaltam que a velocidade de soldagem é uma variável que influencia de forma considerável na qualidade das soldas. Eles afirmam que se a velocidade de soldagem for excessiva em relação as demais grandezas, especialmente à corrente de soldagem, podem ocorrer penetração incompleta e mordeduras. Com relação às características do cordão de solda, Lucas [15] afirma que o ângulo do eletrodo é um parâmetro que não afeta diretamente na penetração. Segundo ele, a capacidade de penetração do arco é determinada pelo grau de constrição e vazão do gás de plasma.

### **3.4 - Variantes do Processo**

O processo plasma apresenta algumas variações em associação com outros processos, objetivando atender certos requisitos desejados em aplicações diversas. Alguns destes principais processos, que foram abordados na literatura pesquisada, são apresentados à seguir.

#### **3.4.1 - Plasma-MIG/MAG**

O processo MIG/MAG é referenciado atualmente por apresentar condições de se obter elevada produtividade, tornando-se um processo cada vez mais utilizado na indústria, especialmente pelas suas características de flexibilidade e de relativo controle da poça em qualquer posição e espessura. Tanto no método convencional, como no método pulsado, é de relevante importância a correta seleção e ajuste dos parâmetros e variáveis de soldagem. Como um exemplo deste compromisso, uma possibilidade de se aumentar a taxa de deposição em soldagem com corrente constante, é aumentando o comprimento do eletrodo (arame de enchimento). Ao mesmo tempo, a molhabilidade do cordão de solda na superfície da peça-obra é reduzida. Uma solda estreita e insatisfatória pode ser formada [16]. Além disso, para elevados valores de corrente, o aumento do comprimento do eletrodo é também limitado pela aparente rotação do arco, que gera uma intensa salpicagem.

Visando minimizar estes efeitos e ao mesmo tempo atingir uma elevada produtividade, Essers [16] apresentou em seu artigo um interessante processo combinado: o plasma-MIG/MAG. Neste, a corrente através do arame de enchimento e a corrente transferida para a peça-obra são de diferentes magnitudes. Parte do gás de proteção consiste de um gás termicamente ionizado ou seja, o plasma. Na figura 2 é apresentada uma das possíveis configurações do plasma-MIG/MAG. Nesse caso, o eletrodo não consumível conectado na polaridade positiva permite que o metal de adição seja transferido em paralelo ao plasma, no modo rotacional. Este modo é decorrente de uma modificação abrupta da transferência por spray, quando se ultrapassa um determinado nível de corrente de transição. Ocorre que o arame que se funde é transferido para a peça em forma de espiral. Este espiral tem inicialmente o diâmetro do arame e diminui gradativamente até alcançar em média 0,6 mm. A causa da rotação pode ser um complexo de forças eletromagnéticas e mecânicas interagindo na fusão do arame de enchimento.

Este processo combinado apresenta vantagens, quando comparado com o MIG/MAG convencional, destacando-se as seguintes [12, 16]:

- a) possibilidade de soldar com grande ou pequena penetração, mantendo maior taxa de deposição;
- b) melhor estabilidade, repetibilidade e controle do modo de transferência;
- c) mínima produção de salpicos;
- d) possibilidade de utilizar alta velocidade na soldagem de chapas muito finas;
- e) melhor desempenho na aplicação de revestimentos protetores.

O processo plasma-MIG/MAG foi pesquisado apenas em laboratório e não teve aplicação industrial, desestimulado talvez por sua complexidade. Entretanto, mostrou ser um processo promissor para aplicações de soldagem e enchimento em juntas de topo ( 1 a 6,0 mm de espessura ) e junta de topo com chanfro em V, respectivamente, seja em aço carbono ou aço inoxidável e na soldagem do alumínio, onde o arco plasma proporciona o efeito de limpeza da superfície da peça-obra.

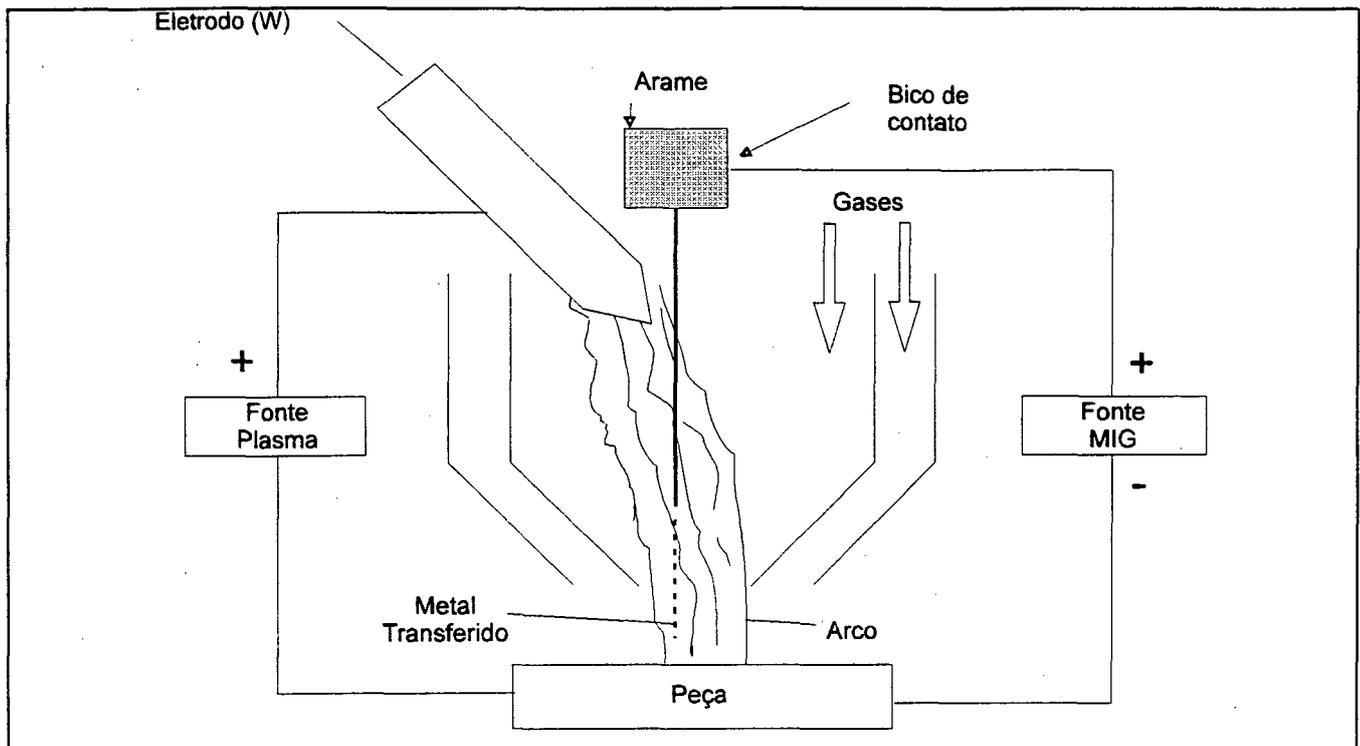


Figura 2 - Representação esquemática do processo plasma-MIG/MAG [12].

### 3.4.2 - Plasma-TIG

Outra importante variante do processo plasma é o plasma-TIG, apresentado no artigo de Klaus Weber [17], que tem sido desenvolvido basicamente para as seguintes aplicações:

- a) soldagem longitudinal de tubos;
- b) soldagem de chapas na posição horizontal ( junta de topo - 3 a 8,0 mm );
- c) soldagem de tanques, válvulas e containers.

São utilizadas duas tochas de soldagem, ou seja, uma tocha para TIG e outra para plasma, conectadas separadamente em fontes de soldagem distintas. Se necessário, uma unidade de alimentação de arame pode ser incorporada ao sistema. Comparado com a soldagem plasma, são destacadas as seguintes vantagens [17]: maior flexibilidade na preparação do material a ser soldado, aumento de aproximadamente 25% na velocidade de soldagem, e melhoria na qualidade metalúrgica das soldas resultantes.

Em muitas aplicações, a penetração é obtida pela tocha de plasma (técnica keyhole), sendo que a tocha de TIG é associada com uma unidade de alimentação de arame, onde este é introduzido para produzir um cordão de solda liso e convexo.

A tocha de soldagem TIG pode ser adaptada com um deflector eletromagnético do arco, que oscila o mesmo na junta, melhorando a aparência do cordão de solda.

### 3.4.3 - Pulverização Térmica por Plasma

Este é um processo que permite o revestimento de superfícies com uma camada relativamente fina de materiais metálicos ou cerâmicos. A pulverização térmica por plasma foi desenvolvida visando atender as exigências apresentadas pela indústria aeroespacial, quando se tornaram necessários revestimentos de alta qualidade com certos carbonetos e óxidos sobre turbinas e motores de foguetes [12, 18, 19]; e pelas indústrias químicas e de geração de energia. Nestas, a maior aplicação do processo é para revestimentos de válvulas controladoras de vazão desgastadas internamente [19]. O modo empregado na produção do plasma é não transferido. A faixa usual de corrente se situa entre 100 e 1000 A, potências desde 12 a 100 kW e diâmetro médio das partículas do pó de revestimento entre 0,02 e 0,1 mm.

O gás de arraste do pó geralmente é o mesmo que forma o plasma. Também é necessário um gás secundário, de proteção. Os gases normalmente utilizados são:

- a) nitrogênio: como gás de plasma, é de baixo custo e por ser diatômico, gera elevada quantidade de calor, resultando em alta taxa de deposição, mas reduz a vida útil do bocal.
- b) argônio: como gás de plasma, forma um jato de alta velocidade, sendo geralmente selecionado para aplicações de carbonetos e materiais refratários.
- c) mistura hélio-argônio ou hélio puro: como gás secundário, aumenta a tensão e a quantidade de calor do plasma, sendo utilizado principalmente com titânio.
- d) hidrogênio: como gás secundário, geralmente misturado com argônio ou nitrogênio, na proporção de 5 a 25%, aumenta a tensão e a quantidade de calor do plasma, não devendo ser empregado em metais que no estado líquido o absorvem.

As principais vantagens da pulverização térmica por plasma sobre as outras técnicas de recobrimento são:

- maior taxa de recobrimento, segundo [5] da ordem de 45 kg/h;
- ampla gama de materiais para pulverização térmica, incluindo pós cerâmicos e metálicos;
- menores limitações na forma da peça a ser jateada.

A qualidade do depósito é controlada pelos seguintes fatores principais: distância do bocal ao substrato, diâmetro médio do pó, local da introdução do pó, corrente e tensão, tipo dos gases empregados e vazão do pó. A pulverização térmica também pode ser realizada em câmara com atmosfera controlada, ocorrendo notável redução da oxidação e porosidade do revestimento.

A companhia norte americana, Thermosystems, uma divisão da “Browning Engineering”, tem adaptado as fontes de energia para corte por plasma utilizando arco transferido, para possibilitar que as mesmas operem com arco não transferido em operações de pulverização térmica [5]. As maiores tensões de saída proporcionam um arco plasma mais longo, que atinge temperaturas superiores a 5537 °C. A velocidade do plasma também atinge velocidades superiores à das fontes convencionais para pulverização térmica por plasma - da ordem de 3658 m/s. O resultado é uma densa e sólida camada depositada. Ensaio metalográficos demonstraram que são obtidos níveis de porosidade menores que 1% do volume depositado [5].

O Plasma com Arco Transferido - PTA, com metal de adição em pó, muitas vezes é confundido com a pulverização térmica por plasma [20]. Na realidade, o plasma com arco transferido é um processo de soldagem que é utilizado essencialmente para revestimento de superfícies, com fusão e conseqüente diluição do metal de base. É aplicado geralmente em operações com ligas de titânio [21], onde um campo de pesquisa relativamente vasto tem sido desenvolvido para proporcionar uma melhor resistência ao desgaste, especialmente em componentes deslizantes de máquinas, como por exemplo, em válvulas e braços de balancim.

### 3.4.4 - Brasagem por Plasma

Este é um processo relativamente recente, que foi desenvolvido pela Coventry University em parceria com a Arc Kinetics [22], e tem sido aplicado na soldagem da carroceria dos carros Jaguar modelo XJ6 e de componentes do seu conjunto. O processo anteriormente utilizado, era a solda-brasagem MIG, que apresentava problemas relevantes, tais como distorções nas chapas soldadas, em virtude da pequena espessura (0,9 mm) e da faixa de corrente requerida (90-100 A), além de apresentar níveis elevados de porosidade e salpico.

A brasagem por plasma apresenta a vantagem de se poder ajustar de forma independente a corrente e a velocidade de alimentação do arame, possibilitando que correntes menores que 50 A sejam empregadas para brazar componentes de espessura igual a 0,9 mm. A taxa de deposição é da ordem de 1,5 kg/h para arame de 0,8 mm de diâmetro. Menores distorções e ausência de salpicagem são outras vantagens proporcionadas pelo processo, bem como a eliminação quase total de porosidades [22].

### 3.4.5 - Micro-plasma

Para soldagem de peças de espessura reduzida, como por exemplo, lâminas de 0,1 mm, uma técnica variante do processo plasma, que é compatível e recomendável para efetuar operações desta natureza, é a soldagem micro-plasma. Uma satisfatória estabilidade do arco é conseguida à níveis de corrente da ordem de 0,1 A, mantendo a forma cilíndrica do arco, que concentra a energia fornecida à peça-obra, minimizando as distorções desta. W. Lucas [15] cita que a faixa de corrente deste processo situa-se de 0,1 a 15 A, embora outros artigos [23, 24] mencionem que a corrente utilizada pode ser da ordem de 30 A.

Exemplos de aplicações do processo incluem: soldagem de seções finas de “foles”, filtros de reduzidas dimensões utilizados na indústria aeroespacial e reparos em pás de rotores, em espessuras da ordem de 0,3 a 0,5 mm. Uma particularidade de relevante importância deste processo é a tolerância às variações do comprimento do arco.

A utilização de corrente pulsada e alimentação de arame também pode ser empregada. O processo é aplicável à soldagem de titânio, aço carbono e aço inoxidável.

### 3.4.6 - Corte por Plasma

A concentração de energia e o efeito de sopro conseguidos com o confinamento do arco são também utilizados para corte de materiais. Através de uma maior vazão do gás de plasma e orifícios constritores de menores diâmetros, consegue-se um aumento considerável da energia entregue à peça-obra, superior inclusive a soldagem plasma.

O “Plasma Arc Cutting” - PAC, baseia-se na fusão do material, contrariamente ao que ocorre com o oxi-corte. Isto torna possível o corte de metais cujos óxidos apresentam ponto de fusão superior ao do metal de base [7, 8].

Este processo foi originalmente desenvolvido na década de 50 [7, 8] para corte de metais não ferrosos, utilizando gás inerte. À partir de seu surgimento e do avanço das pesquisas e modificações subsequentes, surgiu a soldagem plasma [8]. Estas modificações permitiram inclusive, que o corte por plasma se tornasse economicamente viável para aço carbono, aumentando sensivelmente seu campo de aplicação. Normalmente é utilizado em corte de aços carbono até 40 mm de espessura, aços inoxidáveis até 50 mm e alumínio e ligas leves até 100 mm.

Cortes de qualidade geralmente são obtidos com potências moderadas e baixas velocidades de corte. Entretanto, baixas velocidades prejudicam o lado econômico da aplicação do processo de corte por plasma.

Lho et al. [25], estudaram as características do arco durante operações de corte por plasma e os resultados foram utilizados para detectar a distância de contato-peça durante o corte. O sinal de tensão foi mostrado como sendo uma grandeza efetiva para controlar esta variável com uma boa confiabilidade. Este dado é importante, principalmente para projetos de sistemas de controle para o processo de corte por plasma.

### 3.5 - Precauções e segurança

Informações detalhadas de medidas de segurança a serem tomadas ao se trabalhar com o processo plasma são encontradas na edição da ANSI Z49.1 [7]. Algumas recomendações e cuidados necessários, bem como certos fatores que oferecem riscos à saúde do operador, são apresentados na

literatura [7, 8], onde são destacados fatores, tais como, a intensa luminosidade do arco, salpicos, fumos e ruído.

### 3.5.1 - Ruído

A elevada velocidade do jato de plasma gera na tocha um ruído de alta frequência, que é prejudicial as funções auditivas. O nível deste ruído, geralmente depende também da corrente de trabalho. Normalmente, para frequências em torno de 5 a 10 Hz, este nível situa-se numa faixa que já pode provocar distúrbios auditivos.

No processo de soldagem plasma, o nível de ruído emitido fica em torno de 80 a 91 dB. No corte por plasma, uma única tocha em operação, pode emitir algo em torno de 100 dB. Mas, submergindo o arco em água, este nível é reduzido para aproximadamente 20 dB [8]. Um dado importante a ser observado é o tempo diário de exposição. Para níveis de 85 dB o tempo máximo ao qual o operador pode ficar exposto é de 8 horas. Para um nível de ruído maior, em torno de 110 dB, o tempo máximo de exposição deve ser de 15 minutos.

Caso seja necessário exceder este tempo de exposição permissível, cabe ao operador utilizar equipamentos apropriados de segurança, como por exemplo, protetor auricular e/ou tampões de proteção que são introduzidos diretamente no ouvido.

### 3.5.2 - Fumos

Nas operações de soldagem e principalmente corte, podem ser gerados fumos, tais como, dióxido de nitrogênio, ozônio e óxidos do material trabalhado, que requerem um sistema de ventilação forçada por sucção para eliminá-los. É de conhecimento quase geral que o dióxido de nitrogênio é tóxico e pode inclusive ser letal quando respirado por longo tempo. A utilização de exaustores torna-se, deste modo, quase que uma obrigação, podendo ser acompanhado de acessórios que acompanham as máquinas de corte por plasma, que visam auxiliar no controle dos fumos e também do ruído. Um destes acessórios é uma mesa de corte contendo água até a superfície inferior da peça a ser cortada. Os gases com alta velocidade emergentes do jato de plasma, produzem uma turbulência na água. A maior parte das partículas gasosas e fumos ficam então, retidas aí.

Um outro motivo de precaução na utilização do equipamento de corte por plasma, é em relação à alta tensão de circuito aberto (da ordem de 400 V), que pode causar choques letais.

### **3.5.3 - Radiação**

Devido às próprias características do processo, uma intensa radiação é emitida durante a execução das operações, colocando em risco a saúde do operador. A região mais sensível à este agente agressor são os olhos, que devem ser adequadamente protegidos da intensa luminosidade gerada pelo processo. Esta proteção é efetuada com filtros, que são selecionados em função da faixa de corrente.

### **3.5.4 - Gases**

Os gases utilizados no processo também apresentam riscos e um certo grau de insalubridade. Embora estes gases sejam não-inflamáveis, incolores, inodores e insípidos (exceto o dióxido de carbono), os vapores por eles gerados podem causar queimaduras.

No manuseio do hidrogênio devem ser tomados cuidados especiais pois, este é um gás inflamável e a percentagem máxima permissível deste elemento em uma mistura de gases é de 15% [7, 26].

## IV

### SOLDAGEM PLASMA

#### 4.1- Introdução

O crescente número de pesquisas e estudos de novas tecnologias na área de processos de soldagem, indicam que a soldagem plasma é um processo muito promissor para aplicações onde se buscam uma elevada produtividade e qualidade da solda, comparativamente com os processos MIG/MAG e TIG [1, 3, 27]. Um dos motivos é a possibilidade de se obter uma penetração total da solda em um único passe, em chapas já consideradas espessas, e sem a necessidade de preparação da junta com chanfro em V ou em U, que é uma exigência para aplicação dos processos anteriormente citados. Entretanto, este processo carece ainda de maiores informações, tanto tecnológicas, quanto operacionais. Alguns destes aspectos serão abordados neste capítulo.

##### 4.1.1 - O Processo

O processo de soldagem ao arco elétrico denominado de soldagem plasma - "Plasma Arc Welding" - PAW, pode ser considerado uma evolução do processo TIG. Isto porque em ambos os casos têm-se um eletrodo não-consumível de tungstênio e uma proteção do arco voltaico com gás inerte contra a contaminação atmosférica. A principal diferença é que na soldagem plasma o eletrodo fica confinado, concentrando mais o arco, que assume uma forma essencialmente cilíndrica, conforme pode ser observado na figura 3. Consegue-se desta forma uma boa estabilidade direcional e um maior efeito de concentração de energia, produzindo assim uma menor zona afetada pelo calor (ZAC) [7, 13, 15, 17, 27]. A relativa tolerância à variação da distância da tocha em relação à peça-obra é outra vantagem do processo advinda da constrição do arco [28].

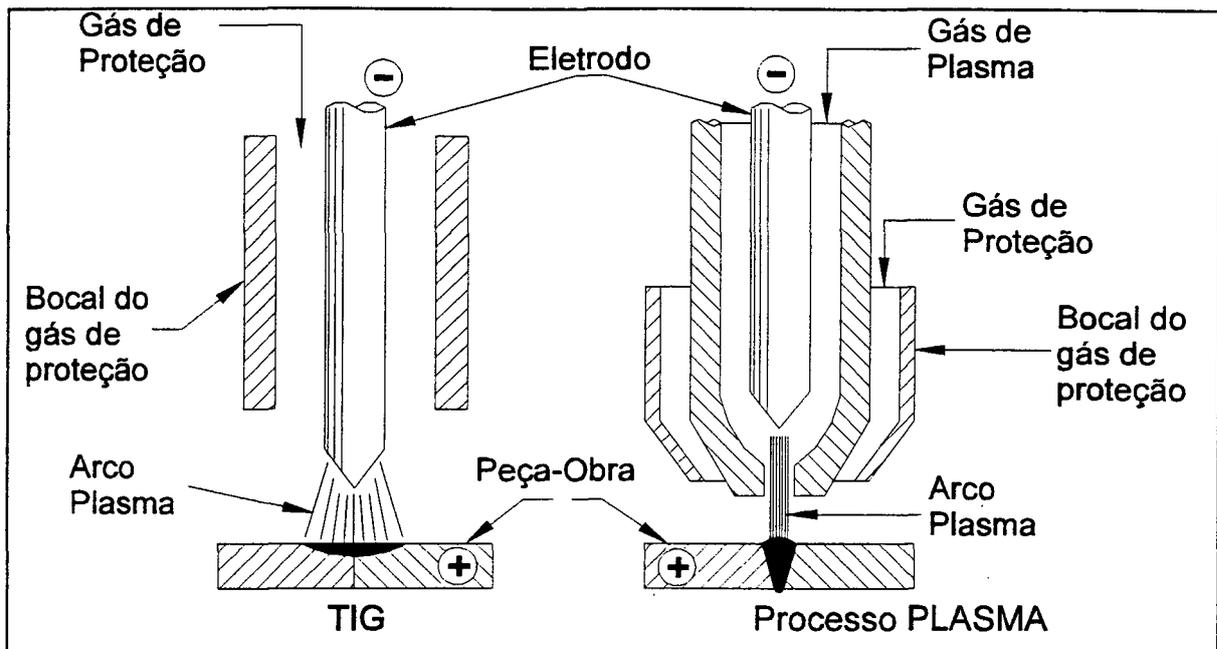


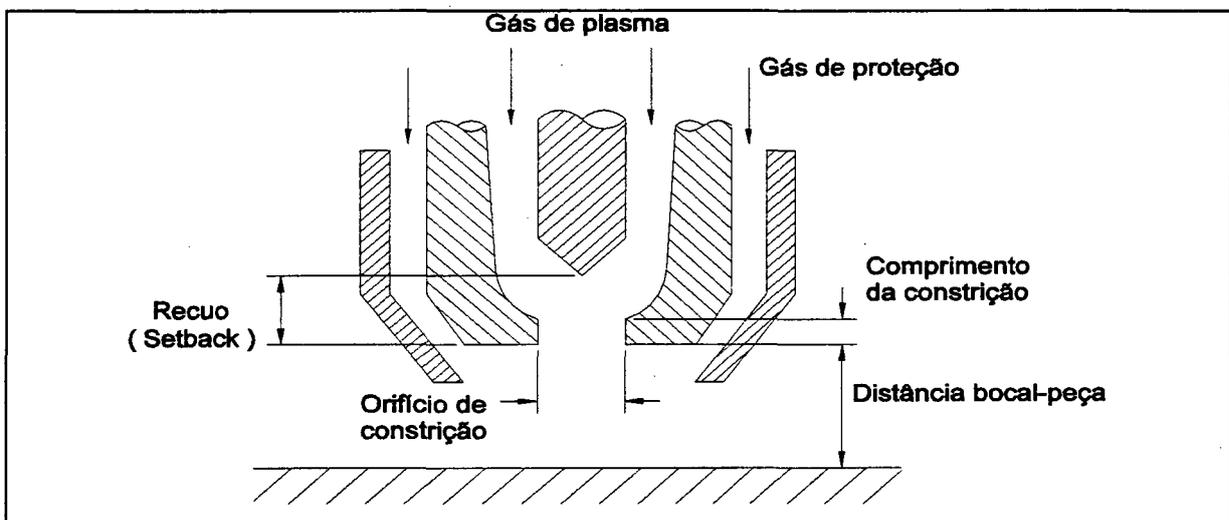
Figura 3 - Comparação entre os processos TIG e Plasma [7].

A AWS - “American Welding Society”, define o PAW como um processo de soldagem que utiliza um arco constricto entre um eletrodo não-consumível e a poça fundida (arco transferido), ou entre o eletrodo e o bocal constritor (arco não-transferido) [26]. O eletrodo é alojado no interior do bocal constritor da tocha de soldagem, o que o impede de possíveis contatos com a poça fundida, evitando-se assim a contaminação da mesma por inclusões de tungstênio. A distância que o eletrodo fica recuado dentro da pistola é denominada de “electrode setback” - distância da face externa do bocal constritor até a ponta do eletrodo. O recuo determina parcialmente o grau de constrição e a rigidez do jato de plasma [12, 29]. A distância da face externa do bocal até a peça-obra é conhecida como “torch standoff” - altura da tocha. Na figura 4 é apresentado um esquema da tocha plasma, mostrando essas grandezas.

Dois fluxos de gases são utilizados. O primeiro é o gás de plasma, que flui por um orifício no bocal constritor e, após ionizar-se, atinge elevadas temperaturas. Este gás deve ser inerte e geralmente utiliza-se o argônio. Existindo somente este gás, se forma na periferia do mesmo uma camada relativamente fria, que envolve a coluna do arco, a qual se desloca em alta velocidade. Há uma perturbação da poça de fusão e aumento do diâmetro do plasma sobre a peça. O segundo fluxo serve para proteção da peça-obra e passa por um bocal externo, concêntrico ao bocal constritor.

Além do efeito de proteção, este gás, muitas vezes é usado quando se procura otimizar algumas propriedades do plasma.

O PAW apresenta ainda uma vantagem adicional em relação aos demais processos de soldagem, podendo-se destacar a penetração total que pode ser obtida em juntas de topo em peças relativamente espessas com um único passe, sem material de adição, reduzindo deste modo o tempo de operação e elevando-se a produtividade em soldas que requerem passe de raiz. O excelente controle da fonte de calor e a grande estabilidade do processo torna possível a soldagem de materiais de espessura inferior a 1 mm, com correntes de 0,1 A até 15 A [15]. Smallbone [23] cita em seu artigo que a corrente para soldar materiais nesta espessura situa-se na faixa de 30 A. Uma característica operacional do processo é a soldagem pela técnica keyhole, que utiliza correntes elevadas, normalmente acima de 100 A, permitindo obter-se uma penetração total da solda.



**Figura 4 - Tocha plasma mostrando algumas variáveis secundárias de controle para soldagem [12].**

O jato de plasma é relativamente inflexível, e vai sempre na direção para a qual foi apontado, sendo por isso muito menos afetado por campos magnéticos. A figura 5 mostra a distribuição da temperatura ao longo de um arco. O lado esquerdo desta figura representa um arco normal não confinado, obtido no TIG, operando a 200 A (CC-), em atmosfera de argônio com uma vazão de 20 l/min. O lado direito ilustra um arco com a mesma corrente, com um fluxo de gás que é confinado pela passagem através de um orifício de 4,8 mm de diâmetro. Sob estas condições, o arco confinado

apresenta uma maior queda de tensão, bem como uma menor dissipação do calor ao longo da coluna do arco, entregando à peça-obra uma maior energia [7].

O processo apresenta, entretanto, algumas limitações e desvantagens, que são apontadas em algumas referências [7, 8, 15]:

- O equipamento de soldagem plasma é mais complexo que os usados em outros processos de soldagem a arco, exigindo cuidados especiais e manutenção mais criteriosa;
- Tochas de soldagem plasma manual são geralmente mais difíceis de serem manipuladas, em comparação com as tochas TIG;
- Custo elevado do equipamento, que pode chegar a cinco vezes mais em relação ao TIG.

São estes fatores, aliados à relativa escassez de informações operacionais, que ainda restringem e contribuem para impedir a implementação do PAW nos diversos seguimentos da indústria.

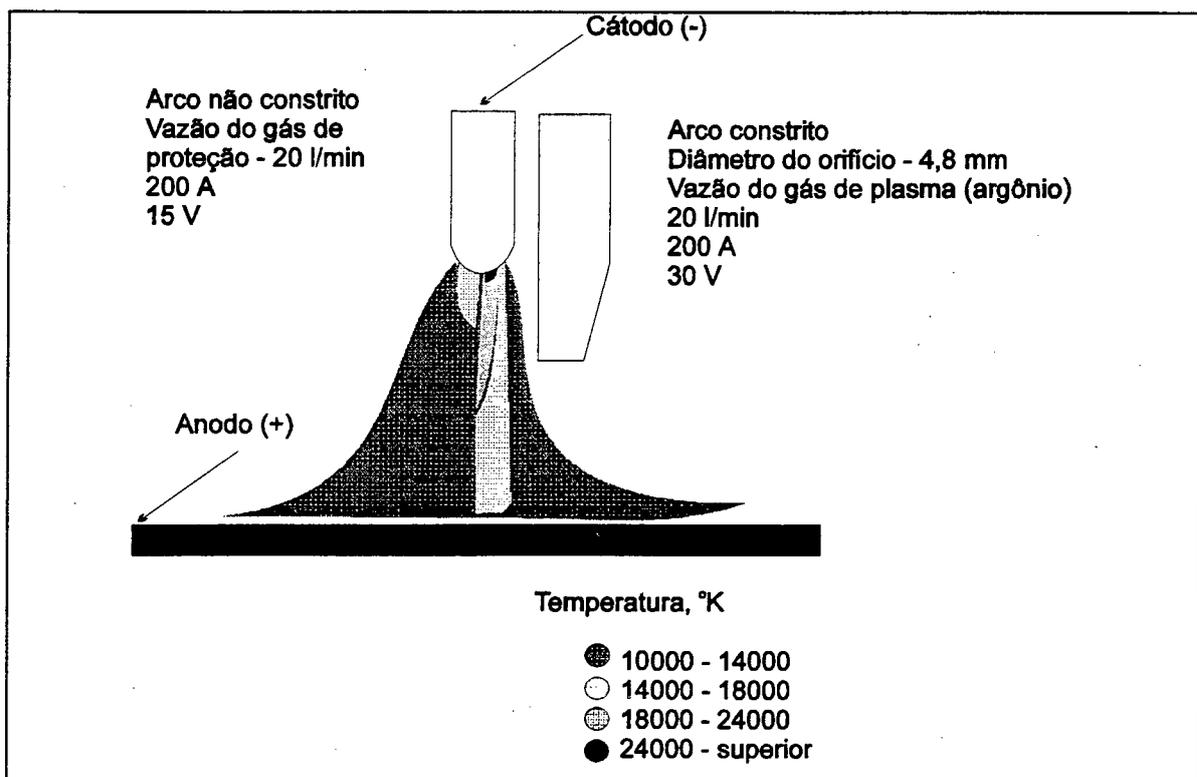


Figura 5 - Efeito da constrição do arco sobre a temperatura e tensão [7].

#### 4.1.2 - Tipos de Correntes de Soldagem e suas Aplicações

Corrente contínua com eletrodo constituindo-se no pólo negativo (polaridade direta) - CCEN, é utilizada na maior parte das operações de soldagem plasma [7, 30]. A faixa usual de corrente situa-se de 0,1 a 500 A. O eletrodo como pólo positivo (polaridade inversa) - CCEP, é usado em limitada extensão para soldagem do Alumínio, visando a retirada da camada óxida que se forma na superfície do material. Seu uso é bastante restrito devido ao excessivo aquecimento do eletrodo provocado fundamentalmente pelo bombardeio de elétrons vindos da peça [31]. Além disto, a corrente de polaridade inversa não proporciona uma boa penetração para remover a porosidade e as inclusões de óxidos [31, 32]. A faixa de utilização da corrente de polaridade inversa situa-se a níveis inferiores a 100 A.

Corrente alternada de onda senoidal pode ser empregada na soldagem de alumínio e ligas de magnésio, embora que de forma restrita e objetivando principalmente a remoção da camada superficial de óxidos. A faixa de corrente é limitada entre 10 e 100 A. Maiores correntes geralmente não são utilizadas, pois provocam um excessivo desgaste do eletrodo quando este é submetido ao ciclo positivo.

Pang et al. [30], mostraram que na soldagem do alumínio e suas ligas uma boa alternativa para se obter soldas de boa qualidade é a utilização da corrente alternada de onda retangular. Esta combina os benefícios da polaridade direta e da polaridade inversa. Em típicos períodos de tempo da ordem de 19 ms na polaridade direta e 4 ms na polaridade inversa, foi verificado um bom efeito de limpeza da peça-obra, mínimo desgaste do eletrodo e boa estabilidade do arco [30]. Uma das teorias é que este efeito de limpeza é atribuído ao bombardeamento iônico de íons acelerados que são lançados sobre a superfície da peça-obra durante o ciclo CCEP. Durante este período íons são liberados pelo eletrodo e bombardeiam os óxidos na superfície da peça-obra. Este bombardeamento remove os óxidos e limpa a liga de alumínio a ser soldada. Este fenômeno é denominado ataque catódico [7]. A eficiência desta limpeza depende da energia de incidência dos íons e de sua massa. Contudo, Cary [32], destaca em seu artigo que em algumas ligas de alumínio (sobretudo da série 5000), o óxido da superfície é extremamente aderente e deve ser removido antes da soldagem, para assegurar a qualidade da solda. Em relação a tais ligas, pode-se usar um passe de limpeza catódica, fresagem ou raspagem, para remoção do óxido. O passe de limpeza catódica é uma técnica que

envolve a limpeza da junta, com polaridade inversa de baixa amperagem. Esta limpeza elétrica rompe o óxido da superfície, sem fundir o metal de base.

Tomsic e Barhorst [4], também destacaram a aplicabilidade satisfatória da corrente alternada de onda retangular para soldagem do alumínio. Eles estabeleceram uma relação entre os tempos e amplitudes de corrente para algumas ligas de alumínio (espessura igual a 6,35 mm), e demonstraram o efeito dos mesmos sobre a solda. Na figura 6 está representado este relacionamento. Recentes pesquisas para soldagem de tanques externos dos ônibus espaciais nos Estados Unidos demonstraram as excelentes qualidades da soldagem plasma em corrente alternada, com a técnica keyhole [4, 31]. Através de testes, produziram-se soldas em alumínio e ligas, com passe único e qualidade muito elevada. Verificaram-se economias quantitativas na produção e nos custos com ensaios não destrutivos. A metodologia anterior consistia de uma operação automática com o processo TIG, utilizando a polaridade direta, com passes múltiplos em um desenho de junta chanfrada em U. Os custos de produção tornavam-se elevados, pois, se fazia necessária a remoção do óxido antes da soldagem, além da configuração da junta com ranhura em U ter que ser preparada e reusinada para reparar defeitos de porosidades. De cada solda fazia-se necessário uma radiografia. Buscou-se então, desenvolver e aperfeiçoar os estudos relacionados a utilização da corrente alternada para suprir estas deficiências, o que prontamente atendeu aos objetivos propostos [30, 31]. As principais vantagens da utilização deste método são os seguintes [4, 32]:

- a) melhora-se muito a qualidade da solda do alumínio porque, pode ser individualmente escolhido o tempo de polaridade positiva e o nível da corrente para se produzir limpeza catódica apropriada da superfície da solda e da face da raiz, adequando-a a cada tipo de alumínio.
- b) não se exige a remoção prévia do óxido para a maioria dos tipos de alumínio.
- c) os custos de soldagem são reduzidos porque, necessitam-se menos passes de solda com o mínimo de preparação do metal de base. Segundo as referências [4, 32] pode-se soldar com um único passe alumínio de até 16,0 mm de espessura em junta de topo. Contudo, não são fornecidos os parâmetros e variáveis de soldagem para esta operação. Acima desta espessura é requerida uma preparação da junta com chanfro.

d) não se exige uma alta frequência contínua sobreposta, eliminando-se assim os problemas que podem causar aos controles dos motores, dos aparelhos eletrônicos e do microcomputador.

Aços ligados, aços inoxidáveis e ligas de níquel e titânio tem sido comumente soldados com corrente pulsada. Segundo W. Lucas [15], são obtidas vantagens consideráveis, tais como penetração total e estabilidade do arco, especialmente em soldagem pela técnica keyhole. A correta determinação das variáveis da corrente pulsada é fundamental para que se tenha uma solda de boa qualidade, livre de defeitos. A amplitude da corrente de pulso e seu respectivo tempo, devem ser mantidos de forma a se obter o keyhole e conseqüentemente, uma penetração total. A amplitude da corrente de base e o tempo de base são mantidos em níveis que garantam a estabilidade do arco sem que ocorra sua extinção, evitando também que ocorra a solidificação completa da poça fundida. As variáveis são determinadas em função da espessura e composição química do material, devendo-se levar em conta os demais parâmetros de soldagem. Para materiais de espessura entre 3 e 6,0 mm, um tempo de pulso mínimo, da ordem de 0,1 s é requerido para reestabilizar a poça de fusão. O tempo de base deve ser ajustado aproximadamente igual ao tempo de pulso, sendo esta relação suficiente para permitir uma adequada solidificação entre os pulsos [15]. Em escala industrial a utilização da corrente pulsada é limitada, especialmente pela dificuldade em estabelecer uma faixa de trabalho dos parâmetros para manter o keyhole e a estabilidade da poça de fusão.

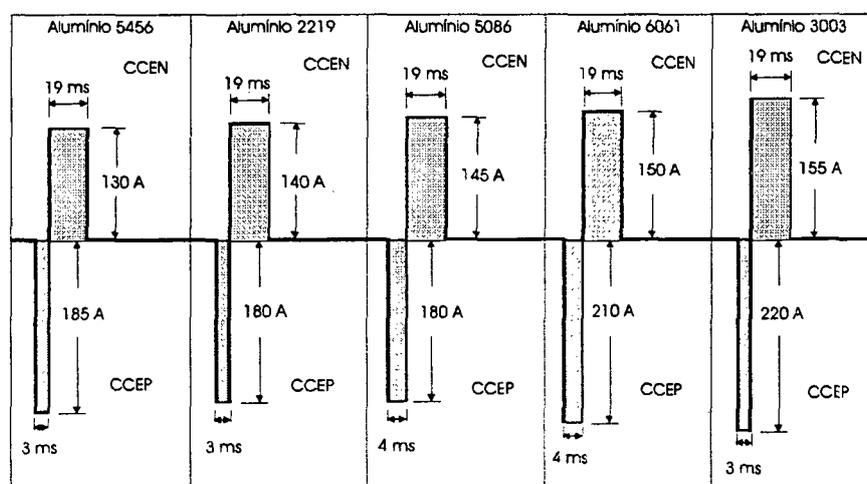


Figura 6 - Relação entre os tempos e amplitudes de corrente para algumas ligas de alumínio (6,35mm) [4].

### 4.1.3 - Equipamentos

A soldagem plasma pode ser efetuada, tanto manualmente, quanto na forma automatizada. O sistema básico para a soldagem manual consiste da tocha, console de controle, fonte de energia, cilindros de gases de plasma e proteção, e acessórios auxiliares, tais como chave para partida e interrupção do arco de soldagem e controle remoto da corrente. Mecanismos de alimentação de arame podem ser também utilizados, se for necessário material de enchimento. Os equipamentos para soldagem manual normalmente trabalham na faixa de corrente contínua compreendida de 0,1 A até 225 A, sendo que o eletrodo constitui-se no pólo negativo.

No sistema automatizado, além dos equipamentos básicos já mencionados, são requeridos componentes extras, que são utilizados para se alcançar vantagens adicionais, associadas com a elevada densidade de corrente do arco plasma, tal como o emprego de maiores velocidades de soldagem. Os componentes consistem de um sistema de posicionamento e deslocamento da tocha de soldagem, circuito eletrônico para estabelecimento do arco piloto, que também é necessário na soldagem manual, além de sistemas de controle e instrumentação mais complexos, como o controle da tensão do arco pela altura da tocha.

Para que se processe o comando e aquisição dos dados, pode-se conectar os componentes do sistema de soldagem a um microcomputador, para que se possa monitorar todas as operações a serem efetuadas. É necessário que se tenha programas específicos e uma placa de comando e aquisição de dados inserida em um dos "slots" do microcomputador. Este procedimento pode ser adotado tanto para soldagem automática quanto manual. As tochas para operações de soldagem automatizadas são disponíveis para a corrente máxima de 500 A [29].

#### a - Fontes de Energia

As fontes de energia para a soldagem plasma apresentam uma curva característica de corrente constante e operam quase que exclusivamente em CC-. A exceção ocorre na soldagem do alumínio, magnésio e suas ligas, em que é utilizada CC+ ou CA de onda retangular, além de corrente pulsada.

As primeiras fontes de soldagem utilizadas eram do tipo transformador-retificador, que essencialmente produziam corrente contínua com tensão de circuito aberto entre 65 e 80 V. Estas

começaram a evoluir. Incorporaram a eletrônica no controle de reatores saturáveis e passaram a usar tiristores diretamente no controle da potência. Surge então, as fontes tiristorizadas. Nestas os tiristores desempenham a dupla função de retificar a corrente alternada ao mesmo tempo em que a controla. No final dos anos 60 surgiram as fontes de energia tiristorizadas pulsadas, que trouxeram melhorias para a soldagem de ligas de alumínio e dos aços cromo-níquel. A desvantagem destas fontes reside primeiramente na possibilidade de ter-se somente frequências de pulsação fixas, já que há uma dependência com a frequência da rede de energia. Além disso, tem-se uma relativa inércia de controle e na duração dos pulsos que é da ordem de 6 a 8 ms. Para se conseguir certas características que as fontes tiristorizadas não possuem, como a regulação contínua das variáveis, foram desenvolvidas as fontes transistorizadas. As primeiras fontes transistorizadas eram do tipo analógico com os transistores operando na região linear, como amplificadores de baixa potência. A grande desvantagem destas fontes são as perdas de energia nos transistores, as quais podem atingir valores superiores a energia fornecida para soldagem. Após as fontes do tipo analógico e, visando minimizar a dissipação desta energia, vieram as fontes do tipo chaveadas, utilizando os transistores de forma semelhante a uma chave para controlar o fluxo de energia. As do tipo chaveada no secundário possuem transformador e retificador do mesmo modo que as analógicas. No entanto, regula a tensão (corrente) produzida através do princípio do chaveamento dos transistores (1 até 20 kHz). As do tipo chaveada no primário operam com uma frequência de chaveamento superior a 20 kHz, o que permite reduzir sensivelmente o tamanho e peso do transformador, obtendo-se daí uma miniaturização da fonte de energia. Deve-se atentar para o fato de que uma chave quando aberta não possui corrente e, quando fechada, não possui tensão sobre seus terminais, resultando em perdas teoricamente nulas.

Atualmente, tem-se demonstrado o desempenho e a aplicação das fontes denominadas comercialmente de inversoras [33]. Na verdade, a real vantagem desta fonte sobre as demais é quase que exclusivamente em função da sua forma compacta e miniaturizada.

## **b - Tochas de Soldagem**

As tochas usadas na soldagem plasma apresentam uma maior complexidade em termos construtivos em relação às utilizadas no processo TIG, pois são necessárias passagens internas para os gases de plasma e proteção, além da água de refrigeração do bocal constritor, que se aquece pelo

calor gerado pelo arco piloto e o arco principal. Os detalhes construtivos da tocha para soldagem automática estão esquematizados na figura 7. No interior da mangueira, que alimenta a tocha com água fria, está montado o cabo que conduz energia para o arco principal; as demais mangueiras são utilizadas para condução de água de retorno e dos gases do arco de plasma e proteção.

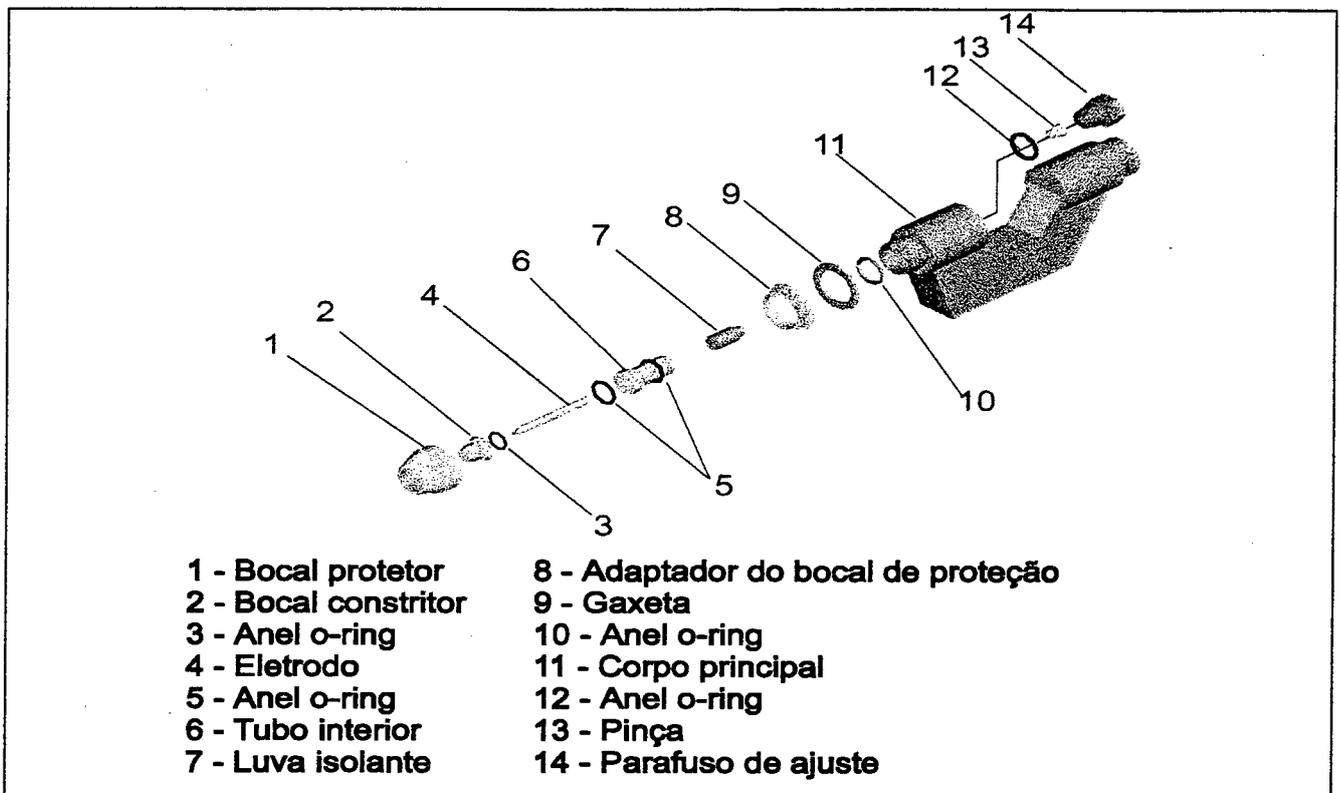


Figura 7 - Detalhe da tocha de soldagem plasma para operação automatizada [29].

Para soldagem automatizada normalmente a tocha comercial de maior capacidade tem sido dimensionada para corrente máxima de 500 A. Tochas para soldagem manual são disponíveis para corrente máxima de 225 A. Rudolf Henne [34] destaca os recentes desenvolvimentos de tochas para soldagem plasma em corrente contínua, que são utilizadas para processos de aspensão térmica, obtendo resultados satisfatórios, tais como, o aumento da eficiência térmica, melhoria na injeção do pó, redução nas flutuações de tensão, melhoria na estabilidade do jato de plasma e da qualidade da camada depositada.

A tocha têm como função alojar o eletrodo de tungstênio, que pode ser puro ou conter um percentual de Th; que segundo W. Lucas [15] não deve exceder a 2%. Eletrodos deste tipo são

utilizados em soldagem em CC-. Estes possuem uma maior capacidade de emissão de elétrons que os eletrodos de tungstênio puro. Eletrodos puros são geralmente selecionados para soldagem em corrente alternada. Eletrodos contendo zircônio são recomendados para soldagem do alumínio, utilizando-se corrente alternada. Eletrodos com adição de cério (1 a 5%) são produtos relativamente novos, mas já se verificou que o mesmo proporciona uma boa estabilidade do arco e apresenta uma satisfatória vida útil [35]. Os eletrodos são especificados segundo a norma AWS/ANSI A5.12. Em operações de soldagem plasma em corrente contínua, o uso do eletrodo como pólo positivo é bastante restrito, principalmente pelo intenso aquecimento do mesmo, o que limita a utilização de maiores densidades de corrente. A ponta do eletrodo deve ser cônica, com ângulo que varia de 20° a 60°. O ângulo do eletrodo não tem um efeito significativo na penetração da solda e é usualmente mantido a 30° [15]. Normalmente, o diâmetro do eletrodo, o ângulo da ponta e o diâmetro do bocal constritor são especificados segundo a corrente máxima recomendada para a tocha de soldagem. Na tabela 1 estão indicados os eletrodos e ângulos de ponta dos mesmos em função da máxima corrente de soldagem. Até 100 A recomenda-se o uso de eletrodos de diâmetro igual a 2,4 mm. Acima desta faixa adota-se eletrodos de diâmetro igual a 4,8 mm. O eletrodo deve ser bem centralizado na tocha no momento em que se for estabelecer seu recuo (setback) no bocal constritor, pois sua descentralização provocaria um aquecimento localizado no bocal, causando a fusão da região mais próxima do contato do eletrodo. Conseqüentemente, seria reduzida a vida útil do bocal.

O bocal constritor, onde o eletrodo fica confinado pode ser de orifício único ou de múltiplos orifícios, sendo normalmente construído de cobre. Bashenko [10], destaca que o diâmetro do furo constritor tem uma grande influência sobre a qualidade da solda. O mesmo fica sujeito ao desgaste, principalmente para operações com arco não transferido. O primeiro tipo é o comumente utilizado. O bocal de múltiplos orifícios, que contém dois pequenos orifícios adicionais em cada lado do principal, pode ser usado em condições de elevada densidade de corrente com o intuito de se controlar a forma do arco e da solda, especialmente em operações de soldagem pela técnica keyhole [15]. O efeito da vazão de gás relativamente fria dos orifícios laterais produzem um arco elíptico que é prolongado ao longo do eixo da solda [36]. Podem ser obtidas velocidades de soldagem de 50 a 100% maiores que as alcançadas com bocais de simples orifícios. Os resultados são soldas com uma menor ZAC e uma maior concentração do jato de plasma na superfície da peça [1].

Corrente máxima (A)			
Capacidade nominal da tocha (A)		Diâmetro do eletrodo (mm)	Ângulo do eletrodo (°)
20	100	200	400
Micro-plasma 5 10 20		1,0	15
Aplicações à correntes médias 30 50 75 100		2,4	30
50 100 160 200		4,8	30
180 200		3,2	60**
Aplicações à elevadas correntes 250 300 350		4,8	60**

**Tabela 1 - Seleção do eletrodo e ângulo de ponta em função da corrente máxima empregada na soldagem plasma. \*\* Eletrodo de ponta arredondada com diâmetro de 1,0 [15].**

### c - Console de Controle do Arco Plasma

O controle de um equipamento para soldagem plasma normalmente compreende: fonte para o arco piloto, válvulas e medidores de vazão dos gases de plasma e de proteção, sensor de medição da vazão de água de refrigeração, indicadores analógicos ou digitais de arco piloto, mostradores de corrente e tensão de soldagem e botão de ajuste de corrente. Para o processo automatizado, é incluído no console o circuito que permite ajustar as variáveis de soldagem, permitindo programar a amplitude, pulsação, declive e intensidade de corrente, bem como controlar a vazão de gases desde a abertura até o término da operação. Existem opcionais para o controle e a monitoração dos fluxos dos gases de plasma e de proteção, e da pressão do gás de plasma [32]. Todas as funções podem ser monitoradas e controladas por um computador. Para iniciar o arco de soldagem, um circuito que gera uma alta tensão em alta frequência estabelece um arco piloto entre o eletrodo e o bocal constritor, já

que o arco não pode ser iniciado por contato, visto que o eletrodo permanece totalmente envolto pelo bocal constritor. Após a abertura deste arco pode ser acionado o arco principal. Durante a operação de soldagem o arco piloto não precisa estar necessariamente ligado. Este arco não transferido ioniza o gás de plasma para fazer com que a corrente de soldagem flua através do gás para a peça-obra. Normalmente, a corrente do arco piloto fica em torno de 5 a 10 A.

#### 4.1.4 - Gases Utilizados no Processo

##### a - Gás de plasma

O gás utilizado para a formação do plasma deve ser inerte, para não causar a deterioração do eletrodo. Segundo Ushio [37], este desgaste é consequência associativa de uma alta densidade de energia e presença de oxigênio no gás. Este assunto tem sido pesquisado na Universidade de Osaka. A vazão do gás de plasma deve ser bem controlada, pois Bennett [38], destaca que pequenas variações (da ordem de 0,2 l/min) causam significantes alterações na solda, podendo ocorrer falta e/ou excesso de penetração, além da possibilidade de corte do material. Para aplicações com o processo PAW, a vazão do gás de plasma é geralmente mantida entre 0,25 a 5,0 l/min, sendo a mesma selecionada em função da espessura e do tipo de material a ser soldado [7]. A tabela 2 mostra os gases utilizados na formação do plasma para soldagem de vários tipos de materiais. O argônio é o gás preferido para arcos com baixa vazão, devido ao seu baixo potencial de ionização, assegurando facilidade na abertura do arco.

Como no processo TIG, é comum a adição de  $H_2$  ao argônio para formar o gás de plasma. Tem-se um aumento da densidade de energia do arco, proporcionando maior eficiência na transferência de calor, o que segundo Moisis e Martikainen [13], melhora a fluidez da poça de fusão e as características de penetração. Isto pode resultar em maiores velocidades de soldagem, com a mesma corrente. Além disso, o  $H_2$  reage com os óxidos e sulfetos ( $MnO$ ,  $MnSiO$ ,  $MnS$ ) presentes na superfície da poça de fusão, reduzindo o efeito destas impurezas. Para soldagem de aços estruturais de espessura entre 3 e 4 mm é praticamente impossível obter soldas com penetração regular utilizando o argônio puro, sendo que os melhores resultados se verificam com adição de 5% de  $H_2$  ao gás de plasma [13]. Esta afirmação não condiz muito com os resultados encontrados neste trabalho, onde foi utilizado o argônio standard e foram obtidas soldas de muito boa qualidade. A

quantidade de  $H_2$  que pode ser utilizado na mistura é limitado, pois em excesso pode causar porosidades e fissuras na solda, além de ser um produto inflamável e de característica explosiva. O percentual de  $H_2$  adicionado ao argônio deve ficar de 5% a no máximo 15%. Tem sido estudado também o efeito do  $H_2$  no refinamento dos grãos em diversos materiais. A pesquisa tem sido conduzida pela Sumitomo Metal Industries [37].

A adição do He ao argônio também produz um arco mais energético para um mesmo valor de corrente, fato este que é atribuído ao seu maior potencial de ionização - 25 eV, comparado com o argônio - 16 eV, além é claro, de sua maior condutividade térmica [38, 39]. A mistura deve conter pelo menos 40% de He para que se possa detectar mudanças significativas no poder energético do arco. Misturas Ar-He, contendo acima de 75% de He, comportam-se como se fossem formados somente de He puro [7]. A utilização do He como gás de plasma aumenta a taxa de calor transferido à tocha, diminuindo sua capacidade de corrente e seu fator de carga. Martinez et al. [39] concluíram que adicionando-se He ao gás de plasma na soldagem do Al 2219 ocorre um substancial aumento da zona de fusão. Bennett [38], destaca que as principais vantagens da utilização do He é a possibilidade de se alcançar maiores velocidades de soldagem e/ou maior penetração, com conseqüente melhoria no perfil da solda. Ele também aponta que as principais desvantagens da utilização do He residem na diminuição da capacidade de corrente e seu elevado custo de mercado. Esta característica limita a utilização do He à soldagem pela técnica convencional, dificultando a aplicação do mesmo em operações pela técnica keyhole.

Uma observação importante à cerca dos gases utilizados na soldagem plasma, é com respeito a presença de elementos contaminantes. Torres et al. [40], procuraram caracterizar os efeitos dos contaminantes presentes nos gases de plasma e proteção, tanto em linhas de gases ou cilindros. O material de base foi o alumínio 2219 e a corrente alternada de onda retangular. Eles concluíram que o surgimento de defeitos, tais como, porosidades, mordeduras e fusão incompleta, podem estar associadas aos contaminantes presentes nos gases.

Metal	Espessura (mm)	Técnica de soldagem	
		Keyhole	Convencional
Aço-carbono	abaixo de 3,2 acima de 3,2	Ar Ar	Ar (75% He + 25%Ar)
Aços de baixa-liga	abaixo de 3,2 acima de 3,2	Ar Ar	Ar (75% He + 25% Ar)
Aços inoxidáveis	abaixo de 3,2 acima de 3,2	Ar, (92,5% Ar + 7,5% H <sub>2</sub> ) Ar, (95% Ar + 5% H <sub>2</sub> )	Ar (75% He + 25% Ar)
Cobre	abaixo de 2,8 acima de 2,8	Ar Não recomendado (*)	(75% He + 25% Ar) He
Ligas de níquel	abaixo de 3,2 acima de 3,2	Ar, (92,5% Ar + 7,5%H <sub>2</sub> ) Ar, (95%Ar + 5%H <sub>2</sub> )	Ar (75% He + 25% Ar)
Metais reativos (titânio, tântalo, Zircônio)	abaixo de 6,4 acima de 6,4	Ar Ar + He (50 a 75% He)	Ar (75% He + 25% Ar)

**Tabela 2 - Seleção de gases a serem utilizados na soldagem plasma. Gás do plasma [7].**

**(\*) A raiz da solda não se formará corretamente.**

### **b - Gás de Proteção**

Para muitas aplicações em soldagem plasma, o gás de proteção é usualmente o mesmo utilizado como gás de plasma. A seleção do tipo de gás é estabelecida em função do material a ser soldado. Recomenda-se a vazão do gás na faixa de 10 a 15 l/min, para aplicações em baixa corrente e de 15 a 30 l/min para elevadas correntes [7]. A referência [5] cita que a vazão do gás situa-se de 10,6 a 74 l/min. Para altas correntes, recomenda-se que o gás de proteção seja o mesmo do plasma, a fim de evitar variações na consistência dos gases. Embora tenha a função de proteger a solda, dependendo de suas propriedades físicas, o gás de proteção pode afetar o arco e as propriedades da solda. A tabela 3 mostra os gases de proteção usuais para a soldagem de alguns materiais. O argônio é o mais utilizado, sendo aplicado para a maior parte dos materiais, tais como, aço carbono, aços de elevada resistência e metais reativos, como o titânio e ligas de zircônio [7, 26, 38]. Na referência [13], é citado que o argônio é o gás que apresenta o melhor resultado na proteção da solda em trabalhos com aços estruturais. Outros pesquisadores citados na mesma referência estudaram o efeito de misturas contendo H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, He, O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>. Eles mostraram que misturas Ar-O<sub>2</sub> e Ar-CO<sub>2</sub> não

apresentam resultados satisfatórios na proteção da solda, gerando uma agitação na poça fundida, instabilidade do arco plasma e condições para formação de poros. Entretanto, misturas deste tipo permitem um aumento de 20% a 30% na velocidade de soldagem, em relação por exemplo, à proteção com argônio puro. Misturas Ar-H<sub>2</sub> permitem obter-se um arco mais constrito, com maior poder de penetração e é recomendado para soldagem de aços inoxidáveis, liga INCONEL, níquel e ligas cobre-níquel [26, 37]. O hidrogênio reduz a tensão superficial da poça fundida, aumentando sua fluidez e permitindo obter maiores penetrações [5]. Entretanto, uma proporção inadequada de H<sub>2</sub> na mistura pode resultar em porosidades, trincas por hidrogênio e redução das propriedades mecânicas da solda [38]. Geralmente o H<sub>2</sub> é adicionado em proporções que variam de 5 a no máximo 15% em argônio [7, 26].

Por ser inerte, o N<sub>2</sub> é utilizado como gás de proteção para soldagem em cobre e apresenta a vantagem de proporcionar uma melhor transferência de energia para a peça [38]. Apresenta a desvantagem de não ser recomendado para aços inoxidáveis e aços carbono por causar significativa redução na tenacidade e propriedades de resistência a corrosão [38]. Porém, Halmoy et al. [3], citam que a adição de 5% de N<sub>2</sub> ao argônio para soldagem de tubos de aço inoxidável duplex, aumentam o conteúdo da austenita na solda, resultando em melhorias na propriedade de resistência à corrosão.

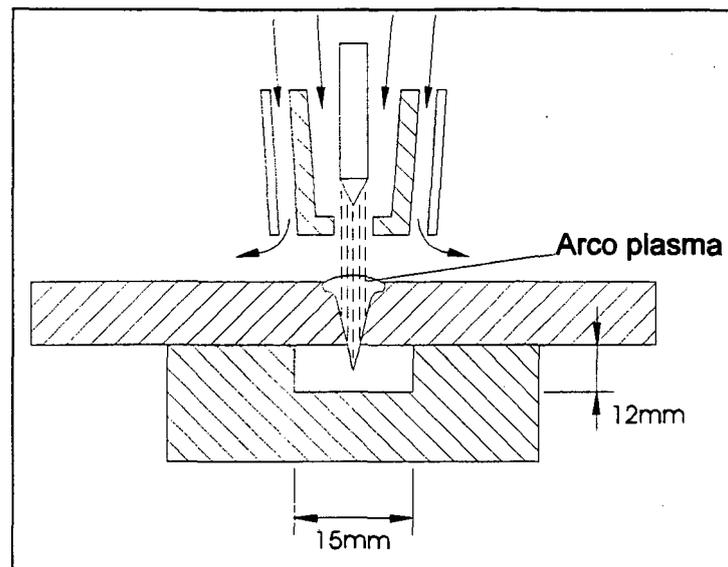
A utilização do He ou misturas Ar-He são limitadas, pelos mesmos motivos apresentados na seção anterior, que tratou dos gases utilizados para formação do plasma. Martinez et al. [41] mostraram que na soldagem do Al 2219 com uma atmosfera protetora de He, que o arco de soldagem é mais estreito, verificando-se um aumento na dimensão da região fundida e redução de perda de calor por condução e convecção no interior desta região. Eryshev et al. [42], efetuaram uma análise comparativa para avaliar as vantagens da utilização de misturas Ar-He na proteção da solda, em comparação com o Ar puro. Eles mostraram que a mistura apresenta uma melhor eficiência, especialmente quando se tem o arco constrito. Orłowski [36], demonstrou que os níveis de porosidades na soldagem do alumínio comercial e da classe 8090 são minimizados quando He é adicionado ao argônio para a proteção da solda.

Proteção com misturas Ar-CO<sub>2</sub> (20 a 30% de CO<sub>2</sub>) melhoram a fluidez da poça fundida e geralmente são utilizadas quando se tem misturas Ar-5% H<sub>2</sub> como gás de plasma, para aplicações de soldagem em aço carbono de espessura de 1,6 a 6,35 mm. Porém, a proteção com esta mistura tem uma aplicação muito limitada [5].

Proteção gasosa da raiz do cordão de solda também é importante e visa assegurar uma solidificação uniforme da poça fundida, além de proteger contra contaminantes atmosféricos. Ela é particularmente importante para assegurar uma solidificação uniforme em materiais que apresentam uma elevada fluidez, como por exemplo aços estruturais não ligados [13]. O esquema adotado para efetuar a proteção no reverso é apresentado na figura 8. A falta de proteção adequada no reverso pode causar porosidade na solda e formar uma raiz irregular, com superfície oxidada e côncava. As propriedades mecânicas da junta soldada não são afetadas, exceto se as irregularidades da raiz forem consideráveis. Os gases mais utilizados para a proteção de reverso são o Ar, N<sub>2</sub>, e misturas de N<sub>2</sub> com 10% de H<sub>2</sub>. O uso de CO<sub>2</sub> é restrito, pois leva à ocorrência de defeitos na raiz [13].

Metal	Espessura (mm)	Técnica de soldagem	
		Keyhole	Convencional
Alumínio	abaixo de 1,6 acima de 1,6	Não recomendado He	Ar, He He
Aço-carbono	abaixo de 1,6 acima de 1,6	Não recomendado Ar, (75% He + 25% Ar)	Ar, (25% He + 75% Ar) Ar, (75% He + 25%Ar)
Aços de baixa-liga	abaixo de 1,6 acima de 1,6	Não recomendado (75% He + 25% Ar) (Ar + 1,5% H <sub>2</sub> )	Ar, He, Ar + (1 a 5% H <sub>2</sub> ) Ar, He, Ar + (1 a 5% H <sub>2</sub> )
Aços inoxidáveis	Todas	Ar, (75% He + 25% Ar) Ar + (1 a 5% H <sub>2</sub> )	Ar, He, Ar + (1 a 5% H <sub>2</sub> )
Cobre	abaixo de 1,6 acima de 1,6	Não recomendado (75% He + 25% Ar), He	He, (75% He + 25% Ar) He
Ligas de níquel	Todas	Ar, (75% He + 25% H <sub>2</sub> ) Ar + (1 a 5% H <sub>2</sub> )	Ar, He, Ar + (1 a 5% H <sub>2</sub> )
Metais reativos (titânio, tântalo, Zircônio)	abaixo de 1,6 acima de 1,6	Ar, (75% He + 25% Ar), He	Ar Ar, (75% He + 25% Ar)

**Tabela 3 - Seleção dos gases de proteção para soldagem plasma. O gás de plasma é o Ar em todos os casos [7].**



**Figura 8 - Esquema da proteção de reverso utilizada na soldagem plasma pela técnica keyhole [15].**

#### 4.1.5 - Material de Base

O PAW é aplicável a todos os materiais considerados soldáveis pelo processo TIG, como por exemplo os aços carbono, aços de baixa liga, aços inoxidáveis, ligas de cobre, ligas de níquel, ligas de cobalto, ligas de alumínio, titânio e zircônio [7].

Uma grande divergência se verifica na literatura com respeito a faixa limite de espessura do material de base que pode ser soldado pelo processo, utilizando-se a técnica keyhole. A referência [7], destaca que materiais de espessura entre 1,6 a 9,5 mm podem ser soldados em um único passe com arco transferido e polaridade direta. Kou [43] afirma que a faixa situa-se de 2,5 a 6,4 mm. Craig [5], cita que para operações com corrente constante e junta sem chanfro, penetração total pode ser obtida para materiais de espessura entre 2,3 e 9,0 mm em um único passe. W. Lucas [15], destaca que até 6,0 mm de espessura se consegue soldar em passe único. Dois ou mais passes são requeridos para maiores espessuras. Neste caso o mais comum é utilizar a técnica keyhole para realizar o passe de raiz e os passes seguintes sendo realizados com o modo convencional por fusão, adicionando-se material. Já Klaus Weber [17], afirma que o aço carbono pode ser soldado em espessuras que vão de 3 a 6,0 mm. A faixa para o aço inoxidável estaria entre 2,5 a 8,0 mm. Porém, Halmoy et al. [3], destacam que no caso do aço inoxidável, uma preparação de junta em V com nariz de 4 a 5,0 mm é

recomendada quando a espessura do material de base estiver compreendida entre 7 a 8,0 mm. L. Quintino et al. [27], demonstram em seu artigo que é possível soldar aço inoxidável de 60 mm de espessura com diversas preparações de junta, mantendo um nariz de 9,0 mm. O passe de raiz é efetuado com o processo plasma e os passes subsequentes com o processo a arco submerso.

Para a soldagem de aços inoxidáveis austeníticos, o PAW apresenta uma vantagem considerável em relação ao TIG: a elevada razão penetração/largura para um menor volume de metal fundido [8]. Ligas de alumínio de espessura até 12,7 mm podem ser soldadas em passe único na posição plana [7]. Na posição vertical ascendente, soldas de passe único podem ser feitas em espessuras até 16,0 mm [32]. Acima deste valor, usa-se uma preparação da junta com um passe de raiz efetuado com o PAW - técnica keyhole, e com um passe adicional com material de adição. Cristian Boucher [44], realizou experimentos soldando titânio e ligas de titânio em diversas posições de soldagem e espessura acima de 12,0 mm e demonstrou que podem ser obtidas soldas de excelente qualidade com penetração regular e propriedades mecânicas bastante similares entre si. Ele utilizou dois processos: O PAW para execução do passe de raiz e o MIG pulsado para os passes de enchimento.

O efeito metalúrgico resultante do calor gerado pelo PAW sobre o metal de base é similar ao processo TIG, exceto pelo menor diâmetro do arco plasma, que proporciona uma menor ZAC, garantindo uma penetração total e cordões mais estreitos.

#### **4.1.6 - Material de Enchimento**

Exceto para juntas de abertura estreita, é usado material de adição no PAW, sendo o mesmo alimentado manualmente como no processo TIG ou automaticamente por alimentador de arame. Geralmente o material de adição é da mesma composição do material de base. A adição de material pode se dar com o arame frio ou previamente aquecido - "arames quente". O arame quente ou fio quente [7], é um interessante meio que visa aumentar a taxa de deposição com o PAW. O arame é alimentado continuamente na poça de fusão, sendo conectado a uma fonte de potência. O eletrodo é conectado em polaridade direta e o arame em corrente alternada. A ponta do consumível não forma arco com a peça, mantendo contato com a poça de fusão e, assim, se aquecendo resistivamente (efeito joule). Dessa forma, o arco fornece a energia adicional necessária para que o arame funda

continuamente, aumentando em muito a taxa de deposição. Se este arame quente sofrer oscilação, há ainda um maior aumento do metal depositado por unidade de tempo. A figura 9 ilustra este comportamento e mostra um comparativo entre os três casos.

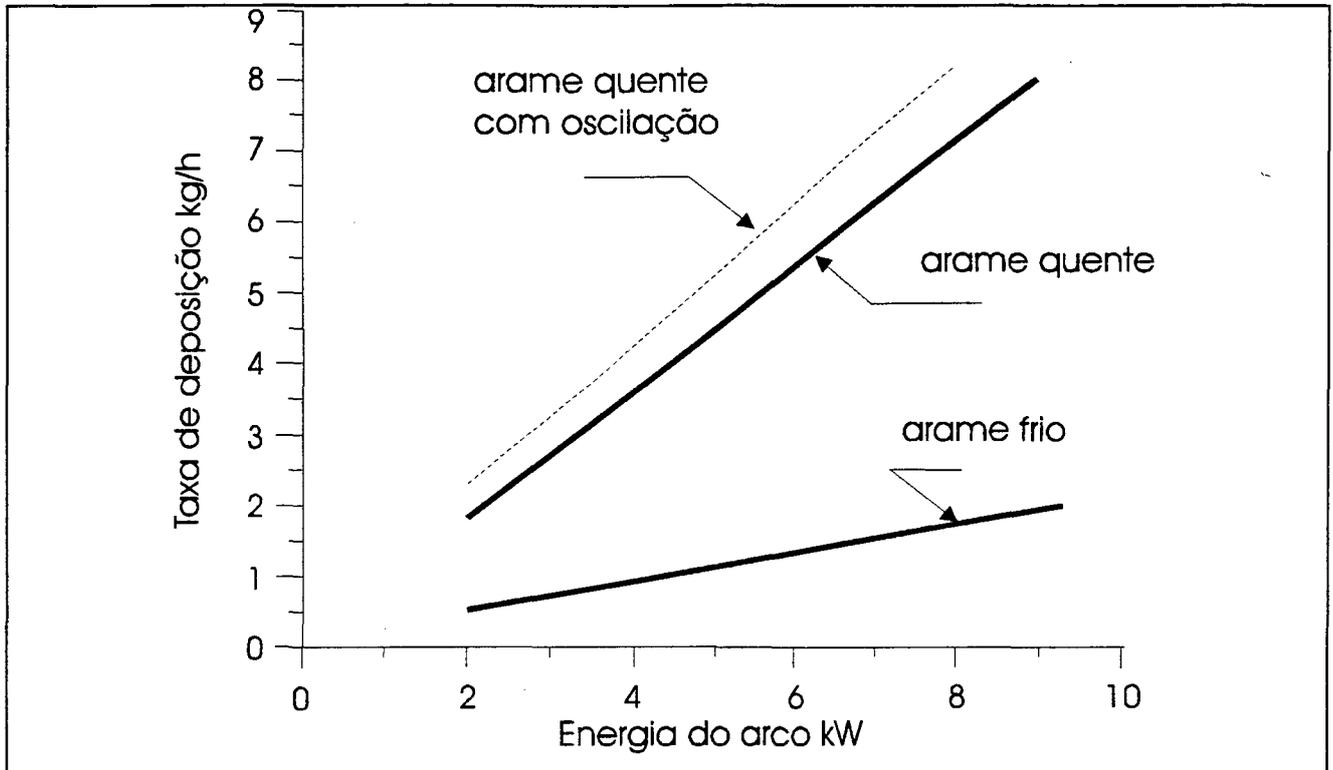


Figura 9 - Taxas de deposição para soldagem com adição de material. Arame quente com e sem oscilação e arame frio [7].

#### 4.1.7 - A Preparação da Junta para a Soldagem Plasma

A abertura da junta, o desencontro e o ajuste são fatores menos críticos no PAW em relação ao TIG e demais processos [8]. Soldas de topo podem ser realizadas com êxito, sem necessidade de usinagem das bordas, em espessuras até 6,35 mm. Materiais de maior espessura requerem a usinagem, pois as arestas cortadas apresentam maiores distorções, aumentando a folga entre as chapas na região da junta [8]. Os tipos de juntas mais usadas no PAW e a espessura de material indicada para cada configuração desta, estão indicadas na figura 10.

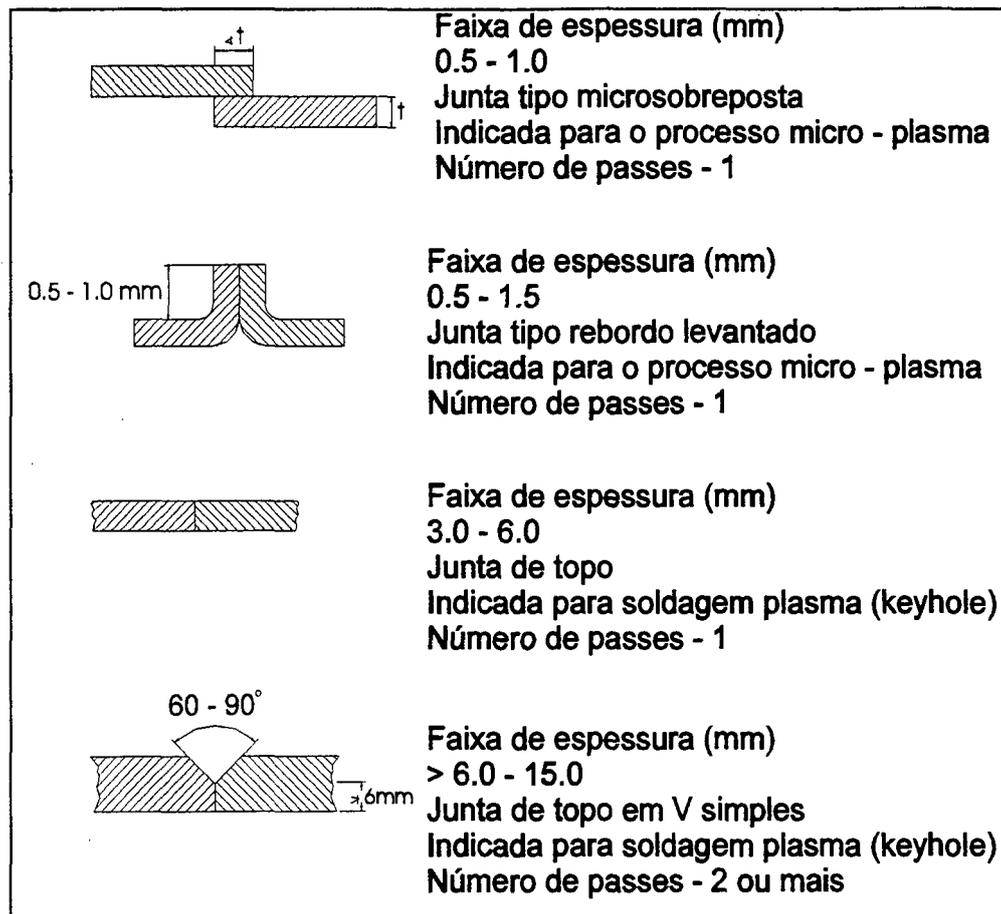


Figura 10 - Tipos e configurações de junta mais indicadas para soldagem plasma [15].

#### a - Peças de Pequena Espessura

Para materiais de pouca espessura, segundo a referência [8] de 0,05 a 0,25 mm, a junta deve ser do tipo rebordo levantado e sendo soldada pela técnica convencional, ou seja, a soldagem usual por fusão. O desencontro permissível fica em torno de  $0,4 \times e$  (e - espessura do material) - mínimo, até o máximo de  $1 \times e$ . Para materiais de espessura 0,25 mm até 1,5 mm, a técnica convencional é efetiva e pode-se soldar com junta de topo, junta em T ou junta em ângulo. Nesta faixa, um desencontro entre as chapas que formam a junta é admissível a no máximo 25% da espessura.

### **b - Peças de Espessura Média**

Acima de 1,5 mm de espessura a técnica keyhole é usada para soldas de topo, sendo recomendado para espessuras até 6,35 mm [8]. A soldagem pode ser realizada em passe único, com ou sem material de adição.

### **c - Peças Espessas**

Para peças de espessura superior a 6,35 mm, recomenda-se a preparação em U ou V, com nariz de 5,0 mm de espessura e chapa de espessura até 10 mm [8]. O desencontro permissível é em torno de 1,6 mm. O ângulo da junta, no caso da preparação em V deve ser de 60°.

## **4.1.8 - Modos de Soldagem**

No PAW dois modos bastante distintos são empregados para soldar peças dentro de uma ampla faixa de espessura. A opção por um ou outro modo depende basicamente da espessura do material de base [8]. Os dois principais modos ou técnicas que se encontram referenciados na literatura são: “melt-in” - a soldagem convencional por fusão, e o keyhole. Este último também é conhecido como técnica do “buraco de fechadura”.

### **a - Melt-in**

No modo convencional, o arco plasma é usado como uma fonte de calor que funde o material de adição (se requerido), e o metal de base; com relativamente pequena ação de penetração. É a soldagem usual por fusão, tal como é realizada no processo TIG. Porém, o calor é mais concentrado e as temperaturas mais elevadas. Para soldagem manual, este modo é o mais comumente utilizado. É empregado para materiais de espessuras até 3,2 mm, com limite de corrente até 200 A e baixa vazão do gás de plasma [8]. Taguchi et al. [45], realizaram um trabalho utilizando o modo convencional por fusão para efetuar soldas na posição vertical, com adição de material. O material de base foi um aço de baixo teor de carbono, em espessuras de 0,8 a 1,6 mm. Eles observaram que nesta posição soldas

com falta de penetração e aspecto irregular tendem a ser formadas. Segundo eles, os defeitos verificados podem ser minimizados aumentando-se a vazão do gás de plasma e adicionando-se o material de adição sem haver contato direto com a poça de fusão - transferência por ponte, sem interrupção.

### b - Técnica Keyhole

Na técnica keyhole, é formada uma pequena poça de fusão, com um furo passante através do metal de base (fig. 11). Esta condição é conseguida pela adequada combinação da vazão do gás de plasma, corrente do arco, velocidade de soldagem e vazão do gás de proteção. A tocha movimenta-se mecanicamente ao longo do cordão. O metal fundido pelo arco é forçado a fluir ao redor do jato de plasma e para trás, onde a poça de fusão está se solidificando. O movimento do metal fundido e a completa penetração permitem que as impurezas fluam para a superfície e os gases sejam expelidos antes da solidificação. O volume máximo da poça e o perfil resultante na raiz são largamente influenciados pelos efeitos de balanço de força entre a tensão superficial do metal fundido e as características de velocidade da vazão de plasma [7, 27, 42]. Esta técnica é geralmente empregada para soldagem na posição plana [7]. Com apropriadas condições de soldagem, em certas faixas de espessura do material, o keyhole pode ser obtido em diversas posições [7].

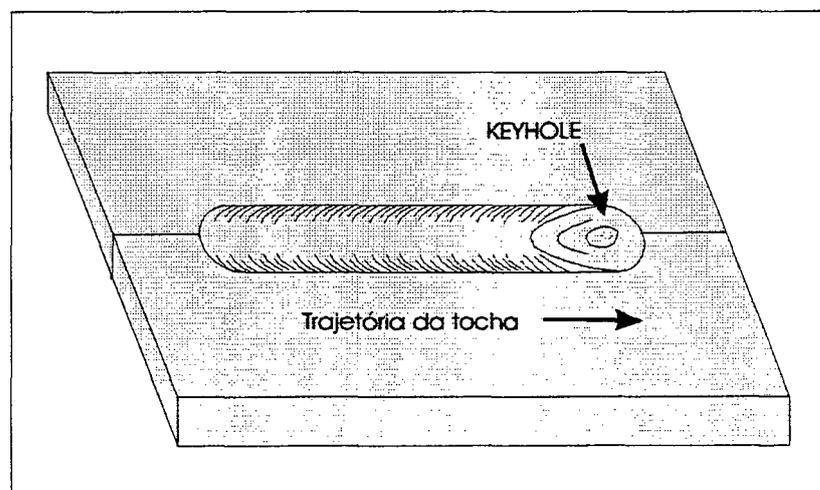


Figura 11 - Representação típica da soldagem plasma pela técnica keyhole [7].

A alta densidade de corrente utilizada nesta técnica faz com que a condição de soldagem ocorra bastante próxima à de corte do material. Na condição de corte, a vazão do gás de plasma é ligeiramente superior ao keyhole, fazendo com que a velocidade do gás expulse para fora o metal fundido. Conseqüentemente, a vazão do gás deve ser suficientemente baixa para permitir apenas que a tensão superficial da poça de fusão fixe o metal fundido na junta soldada.

Para soldagens longitudinal e circunferencial de chapas com espessuras até 3 mm, com o emprego da técnica keyhole, a operação pode já ser iniciada com os parâmetros nominais de soldagem: corrente, velocidade de deslocamento da tocha e vazão do gás de plasma [15]. Nesta faixa de espessura o processo é desenvolvido com pequena perturbação na poça de fusão. Tanto do lado da tocha, como do lado reverso o aspecto é razoavelmente liso. Com chapas de espessuras acima de 3 mm o jato de plasma iniciado com condições nominais de soldagem, tende a escavar debaixo da poça de fusão, causando irregularidades na solda [15]. Devido a este tipo de problema, nas chapas espessas, no início e no final da peça-obra devem ser feitas abas postiças, que serão removidas após o término da soldagem. Na soldagem circunferencial, onde é impraticável o uso de abas, é necessário a utilização de equipamento dotado de um sistema que deve possibilitar na abertura do buraco de fechadura, uma baixa corrente e baixa vazão de gás. A região inicial, percorrida pelo jato de plasma até o estabelecimento completo do buraco de fechadura, deverá ser sobreposta para evitar defeitos na solda. Na finalização, o programador deve permitir um caimento suave da corrente e da vazão de gás, para garantir o fechamento do orifício do buraco de fechadura.

As vantagens da soldagem plasma pela técnica keyhole em relação ao processo TIG, são [7, 27, 31]:

- O fluxo do gás de plasma através do keyhole formado remove os gases que poderiam vir a formar porosidades no cordão de solda;
- A zona de fusão simétrica reduz a tendência à distorções transversais;
- A maior penetração obtida permite uma redução no número de passes requeridos;
- Juntas sem chanfro são geralmente utilizadas, reduzindo o tempo de preparação da junta.

Uma grande vantagem do PAW pela técnica keyhole é a notável produtividade que pode ser alcançada. L. Quintino e J. Cardoso [6], estudaram e definiram os melhores procedimentos de soldagem para diversas configurações de juntas utilizadas na indústria, empregando em caráter comparativo os processos TIG, plasma e eletrodo revestido, utilizando como material de base um aço estrutural C-Mn. Eles verificaram que para soldas em junta de topo em espessuras de 3 a 6,0 mm, o processo plasma apresentou uma produtividade consideravelmente superior em relação aos demais processos, conforme pode ser observado na figura 12. Eles concluíram que o aumento na produtividade e a melhor resistência à fadiga obtida na maioria das juntas estudadas e soldadas por TIG e plasma indicam que estes processos serão brevemente adotados no dia-a-dia da indústria, para trabalhos que requerem alta produtividade e qualidade final da solda. W. Lucas [15], também cita uma substancial vantagem, mostrando que em materiais de espessura igual a 6,0 mm, a solda pode ser efetuada em um único passe, com garantia de penetração total ou até 12 mm em dois passes, ou seja, o primeiro de raiz e o segundo de enchimento. Utilizando-se o processo TIG para soldar um tubo de aço inoxidável de 6,0 mm de espessura foram necessários quatro passes, sendo que a mesma peça foi soldada pelo PAW em dois passes [15]. Neste caso, com o PAW o primeiro passe foi efetuado utilizando-se a técnica keyhole e o segundo passe usando o modo convencional. Caso seja necessário pode ser adicionado material de enchimento.

Diversas referências também abordam a importância e vantagens desta técnica. Harwig et al. [14], registraram uma patente que descreve uma metodologia para obter soldas livre de defeitos, em soldagem plasma pela técnica keyhole, especificamente para soldagem autógena de um aço de elevada resistência - 9 Ni - 4 Co - 0,3 C; em espessuras até 11,0 mm. W. Lucas [2], destaca que a técnica keyhole tem sido largamente utilizada no Japão para soldagem de tubos de aço tipo HK 40 (25% Cr - 20% Ni); substituindo satisfatoriamente o processo TIG, que era anteriormente utilizado. Halmoy et al. [3], apresentaram em seu artigo as recentes aplicações da soldagem plasma pela técnica keyhole. Eles destacaram que elevados ganhos de produtividade, em torno de 85% em comparação com o TIG, tem sido verificados na indústria marítima e de construção naval na Noruega, depois da utilização do PAW. As propriedades mecânicas das juntas soldadas, em termos de resistência a tração e impacto apresentaram resultados bastante satisfatórios, considerando-se a aplicação Off-shore. Martikainen e Moisis [13], examinaram e investigaram o efeito dos parâmetros e variáveis sobre a qualidade da solda em vários tipos de aços estruturais, empregando a técnica keyhole. Eles

apresentaram uma combinação de parâmetros e variáveis de soldagem, especificadas dentro de uma faixa de trabalho que resultam em soldas de elevada qualidade, isentas de defeitos com bom limite de resistência à tração e tenacidade. Howad Cary [32], destacou em seu artigo as principais vantagens da utilização do PAW conforme a técnica keyhole, empregando a corrente alternada para soldagem do alumínio, citando a melhoria da qualidade das soldas, redução dos custos de soldagem e diminuição da distorção nas peças soldadas.

No estudo da soldagem de ligas de alumínio, Martinez et al. [41], descreveram uma técnica para monitorar automaticamente o keyhole pelo lado dianteiro da solda, o que permite detectar a ocorrência de descontinuidades, como por exemplo, a não ocorrência de penetração total. A técnica apresenta a vantagem de poder ser utilizada quando o lado de traz da peça-obra é inacessível e também para outros tipos de materiais soldáveis pela técnica keyhole.

Apesar de apresentar vantagens advindas de sua aplicação, como por exemplo um maior controle sobre a penetração da solda e uma condição de melhor estabilidade, a soldagem plasma por corrente pulsada utilizando a técnica keyhole não tem tido uma grande aplicação na indústria. As principais razões são [15]:

- a) É requerido um rigoroso controle dos parâmetros e variáveis para manter o keyhole e a estabilidade da poça de fusão, sendo os campos de tolerância para variação dos parâmetros e variáveis muito menores em comparação com operações em corrente constante.
- b) Necessita-se de um planejamento preciso para manter e melhorar a reprodutibilidade das soldas.

Embora não tenha um campo de utilização consolidado em termos industriais, encontram-se citações na literatura que relatam aplicações da soldagem plasma pela técnica keyhole com corrente alternada em países como EUA e Ucrânia, especialmente para manutenção de componentes aeromotores, tendo como material de base o aço inoxidável e titânio [15]. As principais vantagens apontadas são a possibilidade de obter-se maiores velocidades de soldagem, penetração total e uniforme e uma simplificação nos procedimentos de preparação da junta. Keanini [46], apresentou em seu artigo um estudo comparativo entre a soldagem plasma pela técnica keyhole em duas

condições: uma sob o efeito da gravidade normal e outra sob a gravidade zero. Ele demonstrou que a gravidade não apresenta um efeito muito significativo no formato e aparência da solda, o que pode ser altamente interessante para operações de soldagem fora da órbita terrestre, como por exemplo reparos em satélites ou até mesmo em ônibus espaciais.

A limitação da técnica keyhole reside na necessidade de um rigoroso controle dos parâmetros e variáveis de soldagem para manter a estabilidade do arco e em condições em que se adiciona material, a provável ocorrência de distúrbios na poça fundida devido a uma inadequada velocidade de alimentação do arame. Entretanto, em materiais sensíveis, como ligas de cobre e níquel, a adição de material durante o passe de raiz é essencial para prevenir porosidades [15].

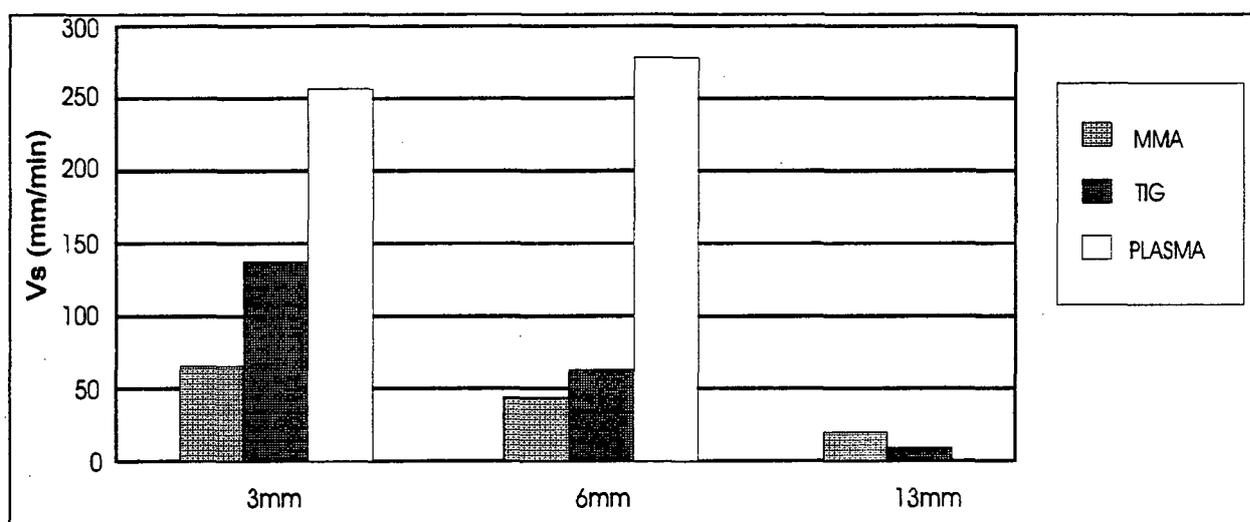


Figura 12- Velocidades de soldagem para os diferentes processos (solda de topo) [6].

#### 4.1.9 - Aplicações da Soldagem Plasma

Embora o arco plasma seja utilizado há cerca de 35 anos para operações de corte, a soldagem plasma é considerada um processo avançado e nobre, devido principalmente aos desenvolvimentos relativamente recentes [1]. Suas aplicações vão desde a utilização em diversos componentes das mais variadas áreas da indústria, bem como à componentes de paredes finas utilizados em equipamentos médicos e de instrumentação, como por exemplo, junções de termopares [8]. Alguns artigos descrevem uma outra linha de aplicação da PAW: a soldagem subaquática molhada por plasma, que tem sido pesquisada na China e principalmente no Japão [47]. Fukushima et al. estudaram a soldagem

plasma subaquática molhada utilizando metal de adição [48]. Os testes foram realizados em água doce, a 100 m de profundidade (aproximadamente 10 atm). O principal resultado obtido foi uma sensível melhora na ductilidade de juntas duplo V, preenchidas com metal de adição Fe-Si-Mn de extra-baixo carbono, e com este mesmo consumível com adição de 0,59% de Ti em peso.

### **a - Soldagem de Tubos**

Uma das aplicações da PAW é sua utilização em reparos e fabricação de tubos, especialmente de aço carbono, aço inoxidável e ligas de cobre e níquel; em espessuras compreendidas entre 3 e 25,4 mm, e até 5 m de comprimento [2, 3]. Esta aplicação tem o uso destacado cada vez mais, principalmente pela introdução nos últimos anos do plasma pulsado, utilizando correntes pulsadas com frequência em torno de 2 a 10 Hz [15, 49]. Aplicações recentes para reparos e fabricação off-shore são apresentadas em [3], destacando-se a soldagem de tubos de aço inoxidável duplex com espessura de 6,4 a 10,6 mm. Para espessuras maiores, normalmente é efetuado um nariz na raiz de aproximadamente 2 a 4 mm. As velocidades de soldagem ficam em torno de 11 a 15 cm /min e as soldas são efetuadas na posição 1G. A redução no tempo de soldagem é considerável e da ordem de 50% em comparação com o TIG.

### **b - Aplicações na Indústria Aeroespacial e Automotiva**

A PAW tem sido utilizada para a união de diversos componentes da indústria aeroespacial, especialmente do programa espacial norte americano [5, 30, 31]. Sua aplicação vai de partes que compõem os motores à jato das aeronaves comerciais e propulsores dos ônibus espaciais à componentes da fuselagem. A mais difundida destas aplicações é a soldagem dos tanques externos de combustível dos ônibus espaciais norte americanos. Nesta aplicação é utilizada a técnica keyhole com material de adição. O material de base é geralmente uma liga de alumínio 2219.

Componentes do sistema de escapamento dos veículos automotores tem sido soldados pelo processo plasma [50], e verificaram-se as seguintes vantagens:

- a) produziram-se soldas completamente automatizadas de elevada qualidade e com muito boa repetibilidade;
- b) obteve-se melhoria nas características metalúrgicas dos componentes soldados;
- c) eliminou-se os custos com material de adição;
- d) mantendo-se fixo os componentes do sistema de escapamento durante a soldagem, eliminou-se os sistemas de deslocamento rotativo dos mesmos.

Hughes et al. descrevem a aplicação da brasagem por plasma para a fabricação dos carros Jaguar. Este novo processo tem substituído a brasagem por MIG, tendo alcançado significantes resultados na relação custo benefício na linha de produção do veículo [22].

### **c - Componentes Nucleares e Vasos de Pressão**

Operações de união que requerem uma alta qualidade e confiabilidade da solda, cuja falha pode causar danos extremamente graves ao meio ambiente, tem sido efetuadas pela PAW. Containers para armazenamento de combustíveis nucleares [8, 17], e vasos de pressão sujeitos à pressões de até 200 bars, utilizados especialmente na indústria petrolífera e de produção de gás são exemplos típicos de aplicação deste processo [2, 3].

#### **4.1.10 - Controle de Qualidade da Solda**

As discontinuidades nas soldas efetuadas pelo processo plasma incluem tanto as superficiais bem como as subsuperficiais.

As discontinuidades superficiais, que são associadas com o contorno da solda e o alinhamento da junta, podem ser detectadas visualmente ou dimensionalmente. Uma destas irregularidades é a falta de penetração que pode ser detectada visualmente através da observação da raiz da solda. As trincas e poros que se originam no interior da solda e se propagam para a superfície da mesma comumente são detectadas através de ensaios por líquido penetrante. A oxidação da região soldada e da própria solda, resultante da contaminação destas regiões por uma proteção inadequada, ou seja, uma irregular vazão do gás, pode ser percebida observando-se a coloração destas regiões.

Entretanto, se deve tomar cuidados para evitar uma avaliação errada, pois segundo [13], quando se solda com argônio puro como gás de plasma, uma escória amarelada, composta basicamente de MnO, MnSiO, MnS, se forma na superfície da poça de fusão. O fenômeno não ocorre quando solda-se com misturas argônio-hidrogênio.

A mais comum das discontinuidades subsuperficiais são as porosidades. Elas são particularmente importantes, pois o tamanho e a quantidade destes poros podem determinar a aprovação ou não da junta soldada. A maneira mais precisa de se detectar este defeito é pelo ensaio radiográfico ou ultrassônico. Outro defeito desta classe que é característico é o tunelamento [7]. Neste, forma-se um severo vazio, presente no interior da solda e em toda extensão desta. Os fatores que contribuem para seu aparecimento são os desalinhamentos da tocha em relação à junta e parâmetros/variáveis de soldagem inadequados, como por exemplo, a velocidade de soldagem [7].

## MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.1 - Introdução

Para que se pudesse proceder um adequado estudo e caracterização da soldagem plasma pela técnica keyhole, buscou-se: (a) verificar a influência de algumas das principais variáveis e parâmetros de soldagem sobre a solda, (b) determinar os melhores valores destas variáveis e parâmetros para se obter o keyhole e uma solda isenta de defeitos; e (c) realizar ensaios para avaliar os resultados obtidos. O padrão de aceitação adotado foi que as soldas obtivessem penetração total (ocorrência do keyhole), com bom aspecto superficial e ausência de defeitos tais como: porosidades, trincas e mordeduras. Os critérios de aceitação adotados para os defeitos detectados foram baseados na norma BS 5500 [51].

Os ensaios e análises realizados compreenderam:

- Análises dimensionais
  - Medições da largura da solda e reforço na raiz.
- Análises metalográficas.
  - Macrografia;
  - Microscopia ótica.
- Ensaio mecânico.
  - Dobramento transversal de face e de raiz.
- Ensaio radiográfico.
  - Em soldas efetuadas em junta de topo.

## 5.2 - Equipamentos

Proceder a montagem da bancada para soldagem plasma envolveu praticamente todos os setores do LABSOLDA - Laboratório de Soldagem da UFSC. Uma perfeita integração entre os setores de mecânica, informática e eletrônica. Foram utilizados para compor a bancada equipamentos com tecnologia nacional já desenvolvidos no laboratório. Um dos equipamentos foi projetado e desenvolvido exclusivamente para compor a bancada de ensaios: o módulo plasma. Sua finalidade é proceder a abertura do arco piloto. Até então, este equipamento não era produzido pelo LABSOLDA, que também não dispunha de uma bancada de ensaios para operar com o processo de soldagem plasma.

A infra-estrutura básica da bancada montada para a realização dos experimentos consistiu da Central de Soldagem INVERSAL 300, Módulo Plasma, Medidores de Vazão de Gás, Sistema de Deslocamento da Tocha de Soldagem, “softwares” desenvolvidos em turbo Pascal, um microcomputador com impressora e uma placa de aquisição de dados, a INTERDATA 2. À exceção do microcomputador e da impressora, todos os demais equipamentos e utilitários foram desenvolvidos no próprio LABSOLDA. Também faz parte da infra-estrutura de experimentação, a tocha de soldagem plasma.

### 5.2.1 - Central de Soldagem INVERSAL 300

Todos os experimentos realizados no escopo deste trabalho foram efetuados utilizando-se a Central de Soldagem INVERSAL 300. O equipamento é uma fonte de energia para soldagem multiprocesso, pois reúne numa mesma fonte, todas as características necessárias para possibilitar sua utilização em vários processos de soldagem, e por isso sua designação como Central de Soldagem [52]. O nome INVERSAL designa a característica inversora e universal da fonte. Esta característica relaciona-se ao fato da INVERSAL permitir operações tanto em corrente contínua bem como em corrente alternada. O número 300 relaciona-se com o valor em ampéres da corrente máxima que a fonte pode operar, com fator de serviço igual a 100%. O valor da corrente máxima para a fonte é da ordem de 450 A. A INVERSAL 300 utiliza transistores de 3ª geração. Estes, denominados de IGBT's (Insulated Gate Bipolar Transistor), unem as características de chaveamento rápido e uma

desprezível corrente de controle dos mosfets com as boas propriedades de condução dos transistores bipolares. A Central de Soldagem emprega para o controle da corrente de saída uma técnica de modulação denominada de valores extremos [53]. Esta técnica permite que se tenha um ripple controlado na corrente de saída. Devido a utilização desta técnica e dos IGBT's, é possível controlar o ripple em  $\pm 5$  A, o que permite atingir menores correntes de soldagem, mantendo o controle sobre a estabilidade do arco. Nas fontes comerciais o ripple não é fixo e atinge valores da ordem de  $\pm 30$  A. Maiores informações sobre a Central de Soldagem são mostradas na tabela 4.

<b>Voltagem</b>	220, 380 ou 440 trifásica
<b>Tensão em vazio</b>	56 V
<b>Corrente</b>	Contínua ou alternada (constante ou pulsada)
<b>Corrente nominal</b>	300 A
<b>Dimensões</b>	0,5 x 0,6 x 1,2 m
<b>Peso</b>	170 kg
<b>Circuito de arrefecimento</b>	3,5 litros de água destilada
<b>Gás externo</b>	Argônio "Standard" ou mistura, conforme o processo
<b>Gás interno</b>	Argônio 99,995% de pureza ou superior
<b>Potência máxima consumida</b>	12 kW
<b>Fator de potência</b>	0,94

**Tabela 4 - Dados técnicos da Central de Soldagem INVERSAL 300.**

### 5.2.2 - Módulo Plasma

A finalidade do módulo plasma é proceder a abertura do arco do processo plasma. Devido ao fato do eletrodo permanecer totalmente envolto pelo bocal constritor, não se pode abrir o arco por contato, tornando-se então indispensável a utilização deste equipamento para estabelecer a abertura do arco. Usa-se um sistema composto por um circuito, que gera uma alta tensão em alta frequência para produzir a ionização da região situada entre a ponta do eletrodo e o bocal constritor. Quando

isto ocorre, abre-se um pequeno arco entre o eletrodo de tungstênio e o bocal, denominado arco piloto, uma vez que existe uma pequena fonte de energia auxiliar ligada entre estes dois elementos.

Este arco piloto é o elemento mantenedor constante da ionização, o que viabiliza o caminho mais fácil para o estabelecimento do arco principal, que é alimentado pela fonte principal de soldagem. A corrente do arco piloto é ajustada em torno de 7 A, pois este valor é suficiente para abrir o arco e garante a integridade da ponta do eletrodo.

### **5.2.3 - Medidores de Vazão de Gás**

Dois medidores de vazão de gás - MVG 20, foram utilizados na execução dos experimentos. Um dos medidores foi conectado na linha que fornece o gás para formação do plasma. Sua faixa de operação é de uma vazão mínima de 0,4 l/min a uma máxima de 6,0 l/min. O segundo medidor foi conectado em uma linha independente da primeira, que fornece o gás para proteção da solda. A faixa de operação deste medidor situa-se a um mínimo de 3,0 l/min e máximo de 20,0 l/min. Ambos medidores já se encontravam devidamente calibrados e em condições para entrarem em operação. O ajuste da vazão dos gases foi efetuado nos reguladores de pressão associados a fluxômetros de esfera instalados em cada cilindro de gás.

### **5.2.4 - Sistema de Deslocamento da Tocha de Soldagem**

O controle da velocidade de deslocamento da tocha de soldagem foi realizado utilizando-se o SDP-600 (Sistema de Deslocamento Computadorizado da Tocha de Soldagem). Neste equipamento o motor é controlado por um conversor, o SDP-COM, através do qual o operador ajusta a velocidade. O dispositivo mede a velocidade de deslocamento da tocha, compara com a velocidade ajustada pelo operador e então a corrige. Isto garante a precisão no deslocamento. A velocidade pode ser controlada pelo painel do aparelho ou por um microcomputador conectado a ele. A posição da pistola só pode ser controlada via micro. Durante a realização dos experimentos a velocidade de soldagem foi controlada pelo painel do aparelho. A velocidade máxima de deslocamento é de 50 cm/min.

### 5.2.5 - “Softwares”

Os “softwares” utilizados neste trabalho foram: Oscilos e CTA1. O Oscilos tem por objetivo simular um osciloscópio de memória digital. O sinal é obtido de uma placa de aquisição de dados (INTERDATA), conectada a um microcomputador. De forma semelhante a um osciloscópio, o “software” possibilita a leitura de dois sinais analógicos de tensão, permitindo que se faça a aquisição de qualquer grandeza física que possa ser convertida em tensão. Durante os experimentos foram adquiridos dados de corrente e tensão instantâneas. O CTA1 que foi o segundo programa a ser utilizado, comanda as vazões de aclave, regime e declive do gás de plasma. Este programa foi elaborado para que se observasse a influência do controle do gás de plasma sobre a abertura e principalmente o fechamento do keyhole durante as soldagens. Para isto, além do programa que foi utilizado em alguns experimentos, utilizou-se uma válvula controladora de vazão mássica fornecida pelo CTA - Centro Tecnológico da Aeronáutica.

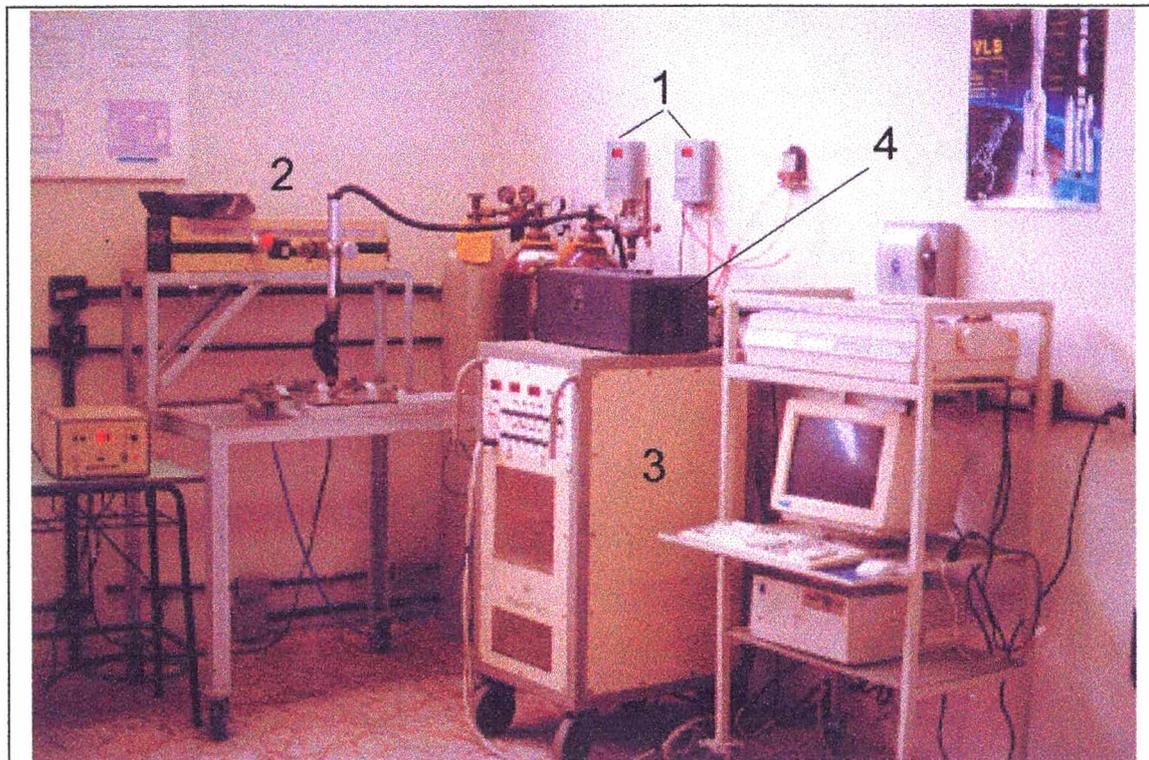
### 5.2.6 - INTERDATA 2

Esta placa pode fazer aquisições em alta frequência, utilizando vários canais, com a vantagem de que a taxa de leitura dos dados é programável. A frequência máxima programável em 1 canal fica em torno de 35 kHz e a placa possui 16 canais de entradas analógicas. A velocidade de aquisição e o tempo de leitura dependem apenas do “hardware” que esteja sendo utilizado, ou seja, dependem da velocidade (clock) do processador do microcomputador onde a placa está instalada.

### 5.2.7 - Tocha de Soldagem Plasma

A tocha utilizada nos experimentos foi a PWM-300 da Thermal Dynamics. Ela é indicada para soldagens em corrente contínua e polaridade direta - CCEN. A corrente máxima para a qual a tocha é indicada é de 300 A. O corpo da tocha consiste basicamente de dois blocos. O primeiro é onde se encontra alojado o eletrodo e o segundo é onde passam os tubos de gases de plasma e proteção, além da água para resfriamento. Na figura 13 pode-se ver a fonte de soldagem, a mesa de soldagem, os

medidores de vazão de gás, o módulo plasma, tocha de soldagem e seu sistema automático de deslocamento.



- 1 - Medidores de Vazão de Gás
- 2 - Sistema de Deslocamento da Tocha (SDP-600)
- 3 - Central de Soldagem INVERSAL 300
- 4 - Módulo Plasma

Figura 13 - Bancada de ensaios para soldagem plasma.

### 5.3 - Materiais Empregados

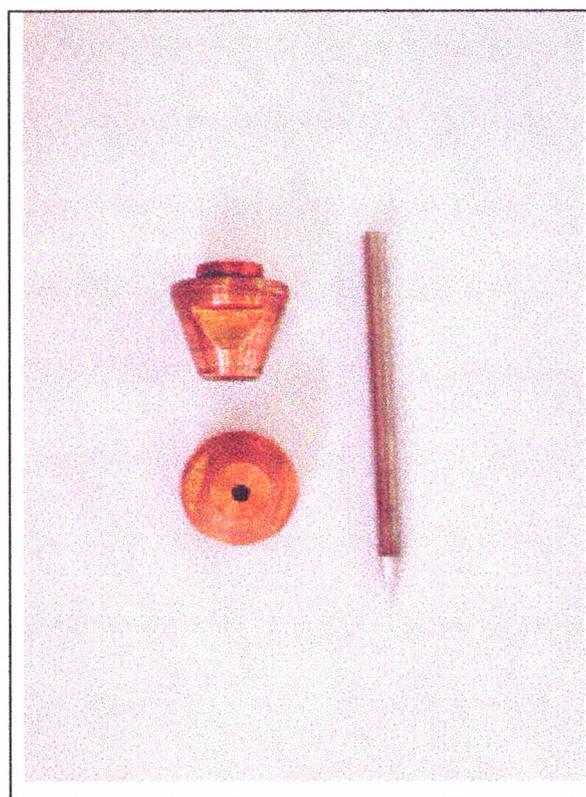
#### 5.3.1 - Material de Base

O material utilizado na maioria dos experimentos e no desenvolvimento deste estudo foi o aço ABNT 1020 de 3,2 (1/8"); 4,8 (3/16"), 6,35 (1/4"), 10 e 25,4 mm (1") de espessura. Em alguns experimentos utilizou-se também os aços AISI 304 de 4,8 mm e SAE 4340 de 4,0 mm de espessura.

### 5.3.2 - Eletrodo e Bocal Constritor

O eletrodo utilizado foi o EWTh2 (tungstênio com 2% de tório), de 4,8 mm de diâmetro. Na maior parte dos experimentos o ângulo da ponta do eletrodo foi mantido a 30°. Na análise da influência do ângulo da ponta do eletrodo sobre as características da solda adotou-se, além do ângulo de 30°, ângulos de 15°, 45° e 60°.

O bocal constritor utilizado foi do mesmo tipo para todos os experimentos realizados. A diferença básica consistia no diâmetro do orifício constritor, que foi selecionado em função da corrente máxima de soldagem para o qual era indicado. A figura 14 ilustra o eletrodo e bocal utilizados nos experimentos.



**Figura 14 - Detalhe do bocal e eletrodo utilizados nos experimentos.**

A referência [29] fornece a relação entre o diâmetro do orifício constritor e a corrente máxima de soldagem, conforme apresentado a seguir.

<u>Diâmetro do orifício constritor [mm]</u>	<u>Corrente máxima [A]</u>
2,4 mm (0,093")	200
2,8 mm (0,113")	250
3,2 mm (0,125")	300

### 5.3.3 - Gases

Os seguintes gases foram utilizados durante a investigação:

Gás de plasma e de proteção: argônio standard. Grau de pureza de 99,99%. Um cilindro para cada linha. Gás de purga: nitrogênio.

## 5.4 - Procedimento Experimental

Um procedimento geral de soldagem foi empregado em todas as etapas deste trabalho. Além deste, procedimentos específicos foram adotados para alguns estudos, conforme a seguir.

### 5.4.1 - Procedimento Geral de Soldagem

Devido a carência de informações tecnológicas disponíveis na literatura pesquisada, ou seja, a insuficiência de dados relacionados às adequadas condições de soldagem aplicáveis a um determinado tipo e espessura de material, especialmente os aços carbono e inoxidável, levou à necessidade da realização de experimentos preliminares. Estes experimentos foram fundamentais para que se pudesse adquirir uma maior sensibilidade em termos da variação dos parâmetros e variáveis de soldagem e sua influência sobre a qualidade da solda. Objetivou também estabelecer as melhores condições para soldar os materiais de base adotados neste trabalho.

Os experimentos foram inicialmente realizados simplesmente com cordões sobre chapas sem haver junções. A superfície da chapa em ambos os lados era submetida a um lixamento prévio para remoção da carepa protetora que se forma sobre o material e o protege contra a oxidação. Foi utilizada a lixadeira pneumática e uma lixa número 80 para efetuar a limpeza. Este procedimento inicial foi adotado para pré-estabelecer as variáveis e parâmetros indicados para obter o keyhole nas espessuras de material indicadas no item 5.3.1, observando-se os dados previamente levantados na literatura e que serviram de referência inicial para o início desta etapa da investigação. As condições de soldagem adotadas para os experimentos preliminares são apresentadas na tabela 5. Obteve-se assim uma grande economia em termos de material e tempo de preparação dos corpos de prova.

Soldou-se na polaridade direta (CC-). Em cada chapa foram efetuadas em média 4 soldas. Estas chapas tinham a dimensão de 150 x 120 mm. Todas as soldagens foram executadas de forma automatizada, já que a tocha era conduzida pelo sistema de deslocamento computadorizado da tocha.

À partir da observação visual das características das soldas efetuadas sobre as chapas, foram determinados os parâmetros e variáveis mais adequados à realização dos ensaios subseqüentes, que constaram a partir desta etapa com corpos de prova confeccionados de duas chapas de 160 x 65 mm. As dimensões dos corpos de prova foram previamente definidas em consonância com a provável energia fornecida (kJ/cm), buscando-se com isso que a distribuição de calor no corpo de prova durante a soldagem fosse uniforme e se comportasse como numa placa semi-infinita, permitindo assim uma regularidade no comportamento do keyhole (adequadas condições de estabilidade e tensão superficial). A configuração da junta adotada na maioria destes ensaios foi a junta de topo com folga zero, com as bordas das chapas usinadas na região da junta. As soldagens foram efetuadas sem adição de material.

O recuo do eletrodo (setback), foi mantido sempre em 2,4 mm (3/32”), utilizando-se para isso um calibre padrão, acessório que acompanha a tocha de soldagem. Além do recuo do eletrodo no interior do bocal constritor, observou-se atentamente a centralização do eletrodo, cuidando-se para evitar sua descentralização no interior do mesmo. O procedimento de limpeza superficial dos corpos de prova foi o mesmo adotado para a chapa sem chanfro. Na análise metalográfica os CP's foram lixados até lixa 600 mesh, polidos e atacados com nital a 5%.

## 5.4.2 - Procedimentos Específicos e Dados de Soldagem

Além do procedimento geral descrito no item 5.4.1, para o estudo de alguns tópicos abaixo relacionados foram adotados procedimentos específicos. As condições de soldagem adotadas para os experimentos do item 5.4.2 (a) ao item 5.4.2 (f) estão apresentadas na tabela 5. Foram as melhores condições levantadas para se soldar o aço 1020 nas espessuras indicadas.

### (a) Levantamento da Repetibilidade dos Resultados

Antes de iniciar um estudo mais abrangente da soldagem plasma, verificou-se a repetibilidade dos resultados, ou seja, a capacidade que o processo tem de repeti-los. A análise se baseou em fundamentos estatísticos e o procedimento geral adotado foi o descrito no item 5.4.1. O material de base foi o aço ABNT 1020, de espessura igual a 4,8 mm.

Este estudo foi realizado baseando-se em medições da largura da solda e reforço na raiz em vários pontos ao longo de cada corpo de prova soldado, sendo um total de cinco CP's. O reforço na raiz foi obtido utilizando-se um paquímetro. A largura da solda foi medida com o auxílio de um projetor de perfis com capacidade de aumento de 10X.

De cada corpo de prova foram extraídos dez valores de largura da solda e sete valores de reforço na raiz. Todos os CP's foram submetidos à mesma metodologia e condições de soldagem. Estes valores foram comparados e submetidos a uma análise estatística (teste F). O procedimento de análise foi o seguinte: tanto para reforço na raiz, quanto para largura da solda procedeu-se o cálculo das médias e desvios padrões de cada amostra (CP1 a CP5), e também a média global. Posteriormente foram calculadas a variação entre amostras ( $Se^2$ ) e a variação residual ( $Sr^2$ ). De posse destes dados aplicou-se o teste F, que indica se há diferença significativa entre as amostras. Basicamente consiste em comparar o coeficiente  $F_{cal}$  com um coeficiente tabelado, o  $F_{crit}$ . O  $F_{cal}$  é encontrado dividindo-se  $Se^2$  por  $Sr^2$ . O  $F_{crit}$  é empírico e extraído das tabelas de distribuição F de SNEDECOR [54].

### **(b) Influência da Distância Tocha-peça**

Para verificar a influência da variação da distância tocha-peça sobre a solda, foi adotado o procedimento geral descrito no item 5.4.1. O material de base foi o aço ABNT 1020, de espessura igual a 6,35 mm. A avaliação foi feita através da observação do aspecto visual das soldas e de macrografias de seções transversais retiradas dos CP's soldados.

### **(c) Influência da Vazão do Gás de Proteção**

O material de base adotado para esta análise foi o aço ABNT 1020 de espessura igual a 6,35 mm. O estudo foi realizado com base na observação do aspecto visual da solda.

### **(d) Influência da Vazão do Gás de Plasma**

Para verificar a influência da vazão do gás de plasma, foi adotado o procedimento descrito no item 5.4.1. O material de base foi o aço ABNT 1020 de 4,8 mm de espessura. A avaliação foi feita através da observação do aspecto visual das soldas.

### **(e) Influência do Ângulo do Eletrodo**

Para esta investigação adotou-se como material de base o aço ABNT 1020 de espessura igual a 6,35 mm. O estudo foi realizado com base na observação do aspecto visual da solda e medindo-se os valores de reforço na raiz e largura da solda. Para medir a largura, utilizou-se o projetor de perfis, com capacidade de aumento de 10X. O reforço na raiz foi medido com o paquímetro. Foram medidos dez valores de reforço na raiz e largura da solda. Foi obtida uma matriz de resultados e foi aplicado o teste F para verificar se havia uma diferença significativa entre as amostras.

**(f) Levantamento da Área de Trabalho de Variáveis e Parâmetros**

O levantamento da área de trabalho de variáveis e parâmetros foi realizado tendo-se como material de base o aço ABNT 1020 de 4,8 mm e 6,35 mm de espessura. Procurou-se realizar o mapeamento das áreas operativas da corrente de soldagem (I) e da velocidade de soldagem (Vs). Para isto foi mantido fixo todos os demais parâmetros e variáveis. Durante a determinação dos melhores valores de I e Vs, fixava-se a velocidade de soldagem e variava-se a corrente até chegar aos seus limites mínimo e máximo, ou seja, quando a solda e a continuidade do processo era afetada. Em seguida era estabelecido um novo valor para Vs e se repetia o processo. O levantamento estava completo quando também eram obtidos os valores mínimo e máximo da velocidade de soldagem.

A análise dos resultados foi feita através da observação visual das soldas.

<i>Parâmetros/variáveis de controle</i>	<i>Experimentos preliminares</i>	<i>Repetibilidade dos resultados</i>	<i>Influência da DTP</i>	<i>Influência da VGPr</i>	<i>Influência da VGP</i>	<i>Influência do ângulo do eletrodo</i>	<i>Levant. da área de trabalho</i>
Espessura do metal de base (mm)	4,8, 6,35, 10 e 25,4	4,8	6,35	6,35	4,8	6,35	4,8 6,35
Ângulo do eletrodo (graus)	30	30	30	30	30	15, 30 45, 60	30
Distância Tocha-Peça DTP (mm)	2 ~ 6	4	2 - 4 - 6 8 - 10	4	4	4	4
Corrente I (A)	100 ~ 280	200	230	230	200	230	100 175 250 250
Vazão do Gás de Plasma VGP (l/min)	0,5 ~ 4	1,2	1,4	1,4	0,8 - 1,2 - 1,7 - 2,2	1,4	1,2 1,4
Vazão do gás de Prot. VGPr (l/min)	2 ~ 15	9,4	9,4	4 - 6 - 8 - 10 - 12	9,4	9,4	9,4
Velocidade de Soldagem Vs (cm/min)	10 ~ 40	20,4	19	19	20,4	19	15 a 15 a 35 25
Diâm. do orifício Constritor (mm)	2,4 - 2,8 - 3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	2,8 3,2
Método de Avaliação	Inspeção visual	Análise dimensional e teste F	Inspeção visual, Macrogr.	Inspeção visual	Inspeção visual	Inspeção visual e teste F	Inspeção visual

Tabela 5 - Condições de soldagem levantadas e adotadas para a realização dos experimentos.

**(g) O Efeito do Gás de Proteção na Raiz da Solda (backing gas)**

Para verificar o efeito do gás de proteção na raiz da solda foram utilizados o aço ABNT 1020 de espessura igual a 6,35 mm e os aços AISI 304 de 4,8 mm de espessura e SAE 4340 de 4,0 mm de espessura. Foi adotado o procedimento geral descrito no item 5.4.1. Soldou-se os CP's com proteção de gás na raiz e sem proteção na raiz. A posição de soldagem foi a plana. As variáveis parâmetros de soldagem utilizados estão apresentados na tabela 6. A avaliação foi feita através da observação do aspecto visual das soldas.

<i>Parâmetros/variáveis de controle</i>	<i>Efeito do gás de proteção na raiz (5 l/min de N<sub>2</sub>)</i>		
	ABNT 1020 6,35 mm	AISI 304 4,8	SAE 4340 4,0
I (A)	230	220	150
VGP (l/min)	1,4	1,2	2,2
VGPr (l/min)	9,4		
Vs (cm/min)	19	22,5	22
Diâmetro do orifício constritor (mm)	3,2		
Ângulo do eletrodo (graus)	30		
DTP (mm)	4		

**Tabela 6 - Condições de soldagem estabelecidas e adotadas para análise do efeito do gás de proteção na raiz da solda.**

**(h) Passe de Raiz em Chapas Espessas com Chanfro em V**

Além das soldas em junta de topo sem chanfro, também foram realizadas algumas soldas em corpos de prova confeccionados com chanfro em V. O material de base foi o aço ABNT 1020 de espessura igual a 10,0 e 25,4 mm. Os corpos de prova foram feitos de duas chapas de 160 x 65 mm. A junta perfazia um ângulo de 90° e a raiz apresentava folga zero. O nariz foi usinado em ambas as chapas que compunham o corpo de prova. Sua dimensão foi de 6,0 mm, mantida em toda a extensão do CP. O primeiro passe (passe de raiz) foi realizado utilizando o processo plasma. O passe de enchimento foi realizado utilizando o processo MIG, com transferência por spray e foi empregado apenas no CP de 10,0 mm. Os parâmetros e variáveis utilizados são mostrados a seguir.

**- Passe de raiz**

Corrente de soldagem ( I ):	245 A
Vazão do gás de plasma (VGP):	1,6 l/min
Vazão do gás de proteção (VGPr):	9,4 l/min
Velocidade de soldagem (Vs):	14,5 cm/min
Distância tocha-peça:	5,0 mm
Diâmetro do bocal constritor:	3,2 mm
Ângulo do eletrodo ( $\alpha$ ):	30°
Posição de soldagem:	Plana

**- Passe de enchimento**

Tensão de controle (U):	37 V
Velocidade do arame (Va):	6,5 m/min
Velocidade de soldagem (Vs):	15,0 cm/min
Distância contato-peça (DCP):	15,0 mm
Gás de proteção:	C18 (82% Ar + 18% CO <sub>2</sub> ) a 15 l/min
Eletrodo:	ER70S-6 $\phi = 1,0$ mm
Polaridade:	CC+
Posição de soldagem:	Plana

A análise foi feita baseando-se na observação do aspecto visual das soldas e de macrografias de seções transversais retiradas dos CP's soldados.

**(i) Ensaio Mecânico e Radiográfico**

Os ensaios mecânico e radiográfico foram realizados tendo-se como material de base o aço ABNT 1020 de 6,35 mm de espesura. Foram preparados dois corpos de prova de dimensões iguais a 200 x 200 mm, junta de topo. A preparação destes corpos de prova seguiu o mesmo procedimento

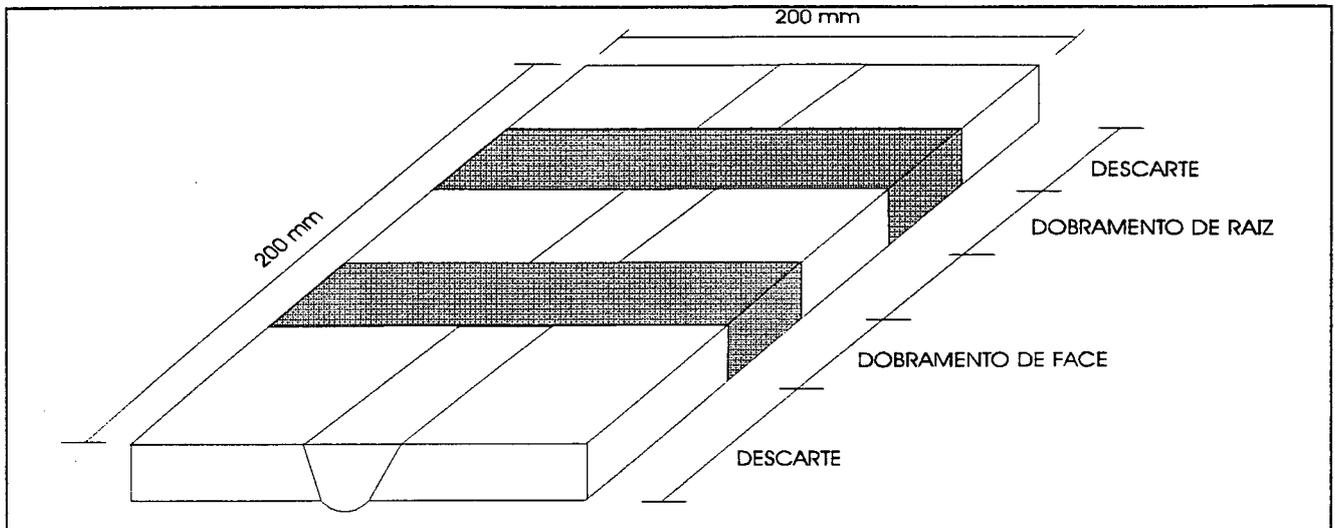
adotado para os demais e que se encontra descrito no item 5.4.1. Os parâmetros e variáveis de soldagem adotados foram:

Corrente de soldagem ( I ):	230 A
Vazão do gás de plasma (VGP):	1,4 l/min
Vazão do gás de proteção (VGPr):	9,4 l/min
Velocidade de soldagem (Vs):	19 cm/min
Distância tocha-peça:	4,0 mm
Diâmetro do bocal constritor:	3,2 mm
Ângulo do eletrodo ( $\alpha$ ):	30°
Posição de soldagem:	Plana

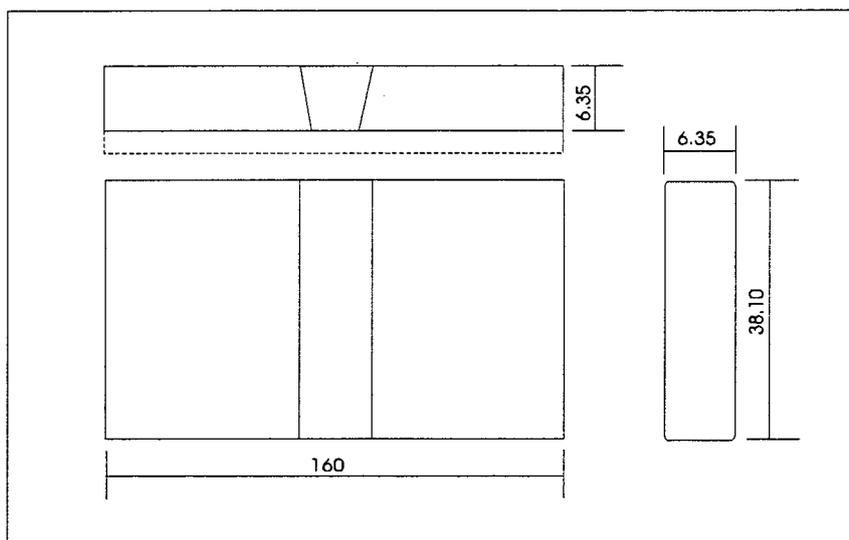
Após a soldagem foi realizado primeiramente o ensaio radiográfico nas duas juntas. Para o ensaio de dobramento transversal de face e de raiz foram utilizadas as mesmas juntas submetidas ao ensaio radiográfico. De cada junta soldada foram retirados dois CP's para ensaio de dobramento. Realizaram-se dois ensaios de dobramento de raiz (um CP retirado de cada junta) e dois ensaios de dobramento de face (um CP retirado de cada junta) [55]. A localização dos corpos de prova nas juntas é apresentada na figura 15. A figura 16 ilustra o corpo de prova utilizado nos ensaios de dobramento de raiz e de face, sendo que o mesmo está em conformidade com o código ASME-Seção IX [55]. A raiz da solda, que é transversal ao CP, foi totalmente removida ficando no mesmo plano do metal base (chapas soldadas). O dobramento transversal de raiz foi realizado dobrando o CP de forma que a raiz da solda ficasse na superfície convexa (externa) do CP dobrado. Idem para o dobramento transversal de face, só que neste a face do CP é que se tornou a superfície convexa (externa).

Aproveitando-se os mesmos parâmetros/variáveis apresentados neste item foram soldados alguns corpos de prova para verificar o efeito do controle da vazão do gás de plasma sobre a abertura e principalmente o fechamento do keyhole. Foi utilizado o programa CTA1, que comandava a válvula controladora de vazão mássica, criando uma rampa de vazão dividida em três fases: a primeira uma fase de aclave, a segunda uma fase constante de regime e a terceira uma fase de declive do gás de

plasma. Conectada à válvula de controle de vazão se encontrava uma fonte de tensão ( $\pm 15$  V). A análise foi baseada no aspecto visual das soldas.



**Figura 15 - Localização dos corpos de prova para ensaio mecânico na junta soldada.**



**Figura 16 - Corpo de prova de dobramento.**

### **(j) Corrente Pulsada**

Foram realizados alguns ensaios utilizando-se a corrente pulsada. O procedimento adotado foi o do item 5.4.1. Foi utilizado como material de base o aço ABNT 1020 de espessuras iguais a 4,8 mm e 6,35 mm. A avaliação foi feita através da observação do aspecto visual das soldas e de macrografias de seções transversais retiradas dos CP's soldados. Mediu-se também a largura da solda, utilizando-se o projetor de perfis com capacidade de aumento igual a 10X, e o reforço na raiz. O reforço foi medido com o paquímetro. Na tabela 7 estão apresentadas as condições de soldagem estabelecidas e adotadas para a realização dos experimentos.

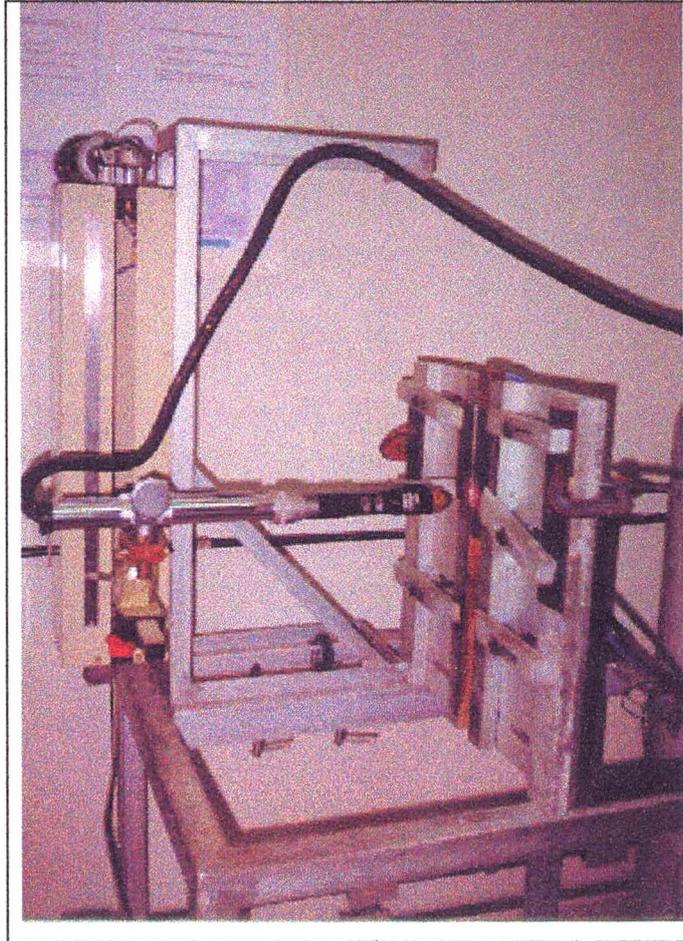
### **(l) Soldagem na Posição Vertical**

Seguindo o caráter de investigação e caracterização da soldagem plasma pela técnica keyhole adotado neste trabalho, foram realizados alguns ensaios na posição vertical. O material de base foi o aço ABNT 1020 de 3,2 mm e 6,35 mm de espessura. Foi adotado o procedimento geral descrito no item 5.4.1. Soldou-se em corrente constante e corrente pulsada, nas posições vertical ascendente e vertical descendente. As condições de soldagem utilizadas estão apresentadas na tabela 7. O estudo foi realizado com base na observação do aspecto visual das soldas e de macrografias de seções transversais retiradas dos CP's soldados. Mediu-se também a largura da solda, utilizando-se o projetor de perfis com capacidade de aumento igual a 10X, e o reforço na raiz. O reforço foi medido com o paquímetro.

A figura 17 ilustra o posicionamento do SDP e a forma como os CP's foram fixados na mesa de soldagem.

Parâmetros/variáveis de controle	Ensaio com corrente pulsada. Posição plana		Soldagem na posição vertical				
			Ascendente		descendente		
			Corrente pulsada				Corrente constante
Espessura do metal-base (mm)	4,8	6,35	6,35	6,35	3,2	3,2	3,2
Ip (A)	220	240	230	250	170		
tp (ms)	250 450	250 450	250				
Ib (A)	90	130	140	140	70		130 A
tb (ms)	250 450	250 450	250				
VGP (l/min)	2	2	1,4	3	1,2		1,2
Vs (cm/min)	17,5	16,5	10,5	20	23,5		23,5
Diâmetro do orifício constritor (mm)			3,2				2,36
Método de avaliação	Inspeção visual, análise dimensional e macrografias						

**Tabela 7 - Condições de soldagem estabelecidas e adotadas para experimentos utilizando a corrente pulsada na posição plana e vertical, e corrente constante na posição vertical.**



**Figura 17 - Posicionamento do SDP e dos CP's para soldagem na posição vertical.**

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 - Levantamento da Repetibilidade dos Resultados

A verificação da capacidade que o processo tem de repetir os resultados pode ser observada nas tabelas 8 e 9, que retratam respectivamente, os dados levantados e calculados para reforço na raiz e largura da solda. Abaixo de cada tabela são mostradas as grandezas calculadas para o processamento desta análise, baseada no método da análise da variância [56]. Defini-se repetibilidade como: “Variação das medições obtidas quando o mesmo operador mede a mesma dimensão ou característica várias vezes utilizando o mesmo instrumento e método” [54]. Entenda-se aqui como repetibilidade, no caso específico da soldagem plasma, o objetivo de se conseguir resultados similares utilizando para soldar os CP’s (amostras), os mesmos métodos, operador, preparação de amostras e procedimentos de soldagem idênticos. Os resultados foram avaliados observando-se as variações de largura da solda e reforço na raiz.

Com relação ao reforço na raiz, verificou-se que  $F_{cal}$  foi menor que  $F_{crit}$  ( $0,1684 < 9,15$ ). Demonstra-se que não há diferenças significativas entre as amostras. Portanto há repetibilidade.

No caso da largura da solda, nota-se também uma boa repetibilidade, a exemplo do que foi observado com relação ao reforço na raiz. Para este caso verifica-se também que  $F_{cal}$  foi menor que  $F_{crit}$  ( $4,49 < 6,42$ ). Deste modo, pode-se dizer que a repetibilidade dos resultados é boa e em 99% dos casos os valores de largura da solda e reforço na raiz estarão dentro da faixa de repetibilidade. Adotou-se para ambos os casos o nível de significância de 1%. Cabe aqui ressaltar que os valores de reforço na raiz medidos nos corpos de prova estão enquadrados dentro dos níveis de aceitação propostos pelas normas BS [51] e DIN [57], que é de no máximo 1,0 mm. Não foi encontrado em norma um critério de aceitação aplicável à largura da solda.

Reforço na raiz					
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
	0,70	0,80	0,70	0,70	0,70
	0,80	0,80	0,80	0,75	0,80
	0,60	0,90	0,70	0,70	0,80
	0,70	0,90	0,70	0,75	0,70
	0,80	0,70	0,80	0,80	0,80
	0,80	0,70	0,90	0,75	0,70
	0,80	0,80	0,80	0,75	0,90
<b>Média (<math>\bar{x}</math>)</b>	0,74	0,80	0,77	0,74	0,77
<b>Desvio padrão (<math>\sigma</math>)</b>	0,07	0,08	0,07	0,03	0,07
<b>Média total (<math>\bar{x}_t</math>)</b>	0,77				

**Tabela 8 - Dados levantados e calculados em relação ao reforço na raiz.**

**a) Variação entre amostras:**

- Variação das médias em torno da média global

$$SQE = 0,019$$

$$Ve = (k - 1) = 4$$

$k \Rightarrow$  Número de amostras

$$Se^2 = 0,00475$$

**b) Variação residual**

- Variação em torno da média de cada amostra

$$SQR = 0,1695$$

$$Vr = (n - 1) = 6$$

$n \Rightarrow$  Tamanho de cada amostra

$$Sr^2 = 0,0282$$

Logo:  $F_{cal} (0,1684) < F_{crit} (9,15)$

Largura da solda					
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
	7,65	8,05	7,40	7,40	8,10
	7,85	8,10	7,50	7,50	8,10
	7,90	8,00	7,70	7,50	8,10
	7,90	7,90	7,90	7,50	8,10
	7,90	7,85	8,00	7,45	8,00
	7,90	7,80	8,10	7,50	8,00
	7,90	7,80	8,05	7,50	8,00
	7,90	7,80	8,00	7,55	8,00
	7,95	7,90	7,95	7,60	8,10
	8,00	7,90	8,00	7,70	8,05
<b>Média (<math>\bar{x}</math>)</b>	7,89	7,91	7,86	7,52	8,06
<b>Desvio padrão (<math>\sigma</math>)</b>	0,09	0,10	0,23	0,08	0,05
<b>Média total (<math>\bar{x}_t</math>)</b>	7,85				

Tabela 9 - Dados levantados e calculados em relação à largura da solda.

**a) Variação entre amostras:**

- Variação das médias em torno da média global

SQE = 1,58

Ve = (k - 1) = 4

k  $\Rightarrow$  Número de amostras

Se<sup>2</sup> = 0,395

**b) Variação residual**

- Variação em torno da média de cada amostra

SQR = 0,7915

Vr = (n - 1) = 9

n  $\Rightarrow$  Tamanho de cada amostra

Sr<sup>2</sup> = 0,0879

Logo: Fcal (4,49) < Fcrit (6,42)

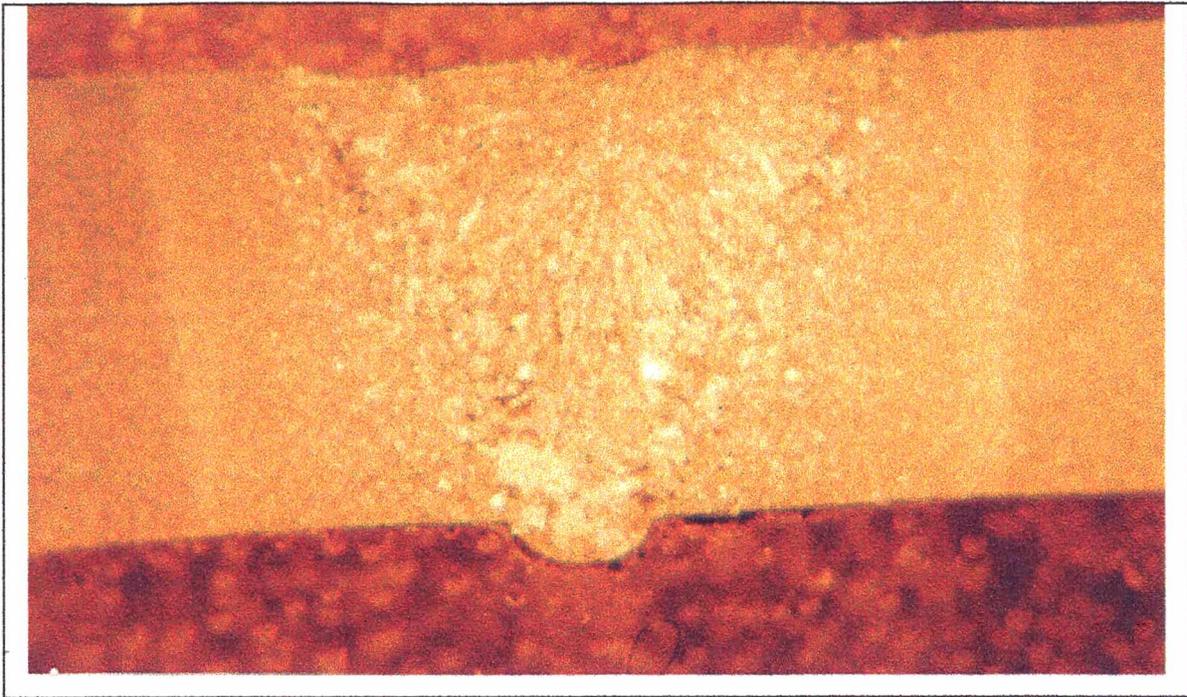
## 6.2 - Influência da Distância Tocha-Peça

A priori, já se esperava que o efeito da variação da distância tocha-peça se mostrasse um fator menos crítico no processo plasma em relação, por exemplo, ao processo TIG, especialmente pela forma cilíndrica do jato de plasma [7, 8]. Contudo, antes de prosseguir com os experimentos subsequentes, era necessário quantificar ou pelo menos se ter uma idéia da influência deste fator.

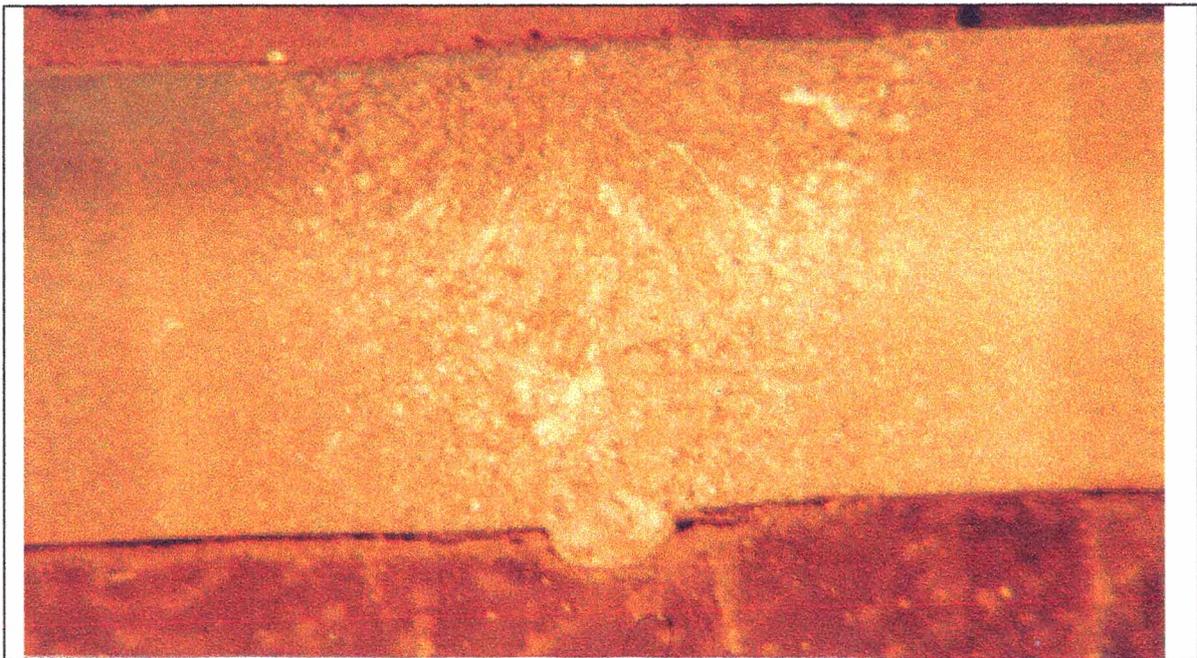
Pôde-se observar que soldas de diferentes aspectos foram produzidas quando se alterou a distância tocha-peça. As figuras 18 a 22 retratam as macrografias com aumento de 10X de seções transversais retiradas dos corpos de prova ensaiados. Os melhores resultados foram verificados para uma distância tocha-peça compreendida entre 2,0 e 6,0 mm. Nesta faixa observa-se que as soldas apresentam um aspecto bastante satisfatório, com penetração total e uniforme. Para uma distância tocha-peça superior a 6,0 mm foi verificado uma intensa turbulência do keyhole, agravada principalmente pela não ocorrência de penetração total. Durante este período de instabilidade uma parcela considerável em volume de metal fundido e constituinte da poça de fusão era lançado em direção ao bocal constritor da tocha de soldagem. Este material quando em contato com o bocal provocava danos ao mesmo, que praticamente era inutilizado após a operação.

Nota-se também um ligeiro aumento da ZAC à medida que se aumenta a distância tocha-peça. Este resultado pode ser explicado pelo fato de que o jato de plasma que incide sobre a peça-obra deixa de apresentar uma forma aproximadamente cilíndrica, tornando-se relativamente cônico. Isto se deve à própria expansão da coluna do arco no maior espaço existente entre o bocal constritor e a superfície da peça-obra. Outro fato importante a ser considerado é que se verificou a ocorrência de tunelamento e porosidades para distância tocha-peça de 8,0 e 10,0 mm, como pode ser observado nas figuras 21 e 22, respectivamente. No que diz respeito a largura da solda, verificou-se que à medida em que se aumentou a distância tocha-peça, a largura também aumentou. Isto pode ser explicado pelo aumento da largura do feixe de plasma, que provoca um aumento da tensão do arco. Tem-se deste modo um aumento da largura da solda, que é acompanhado de um aumento da ZAC.

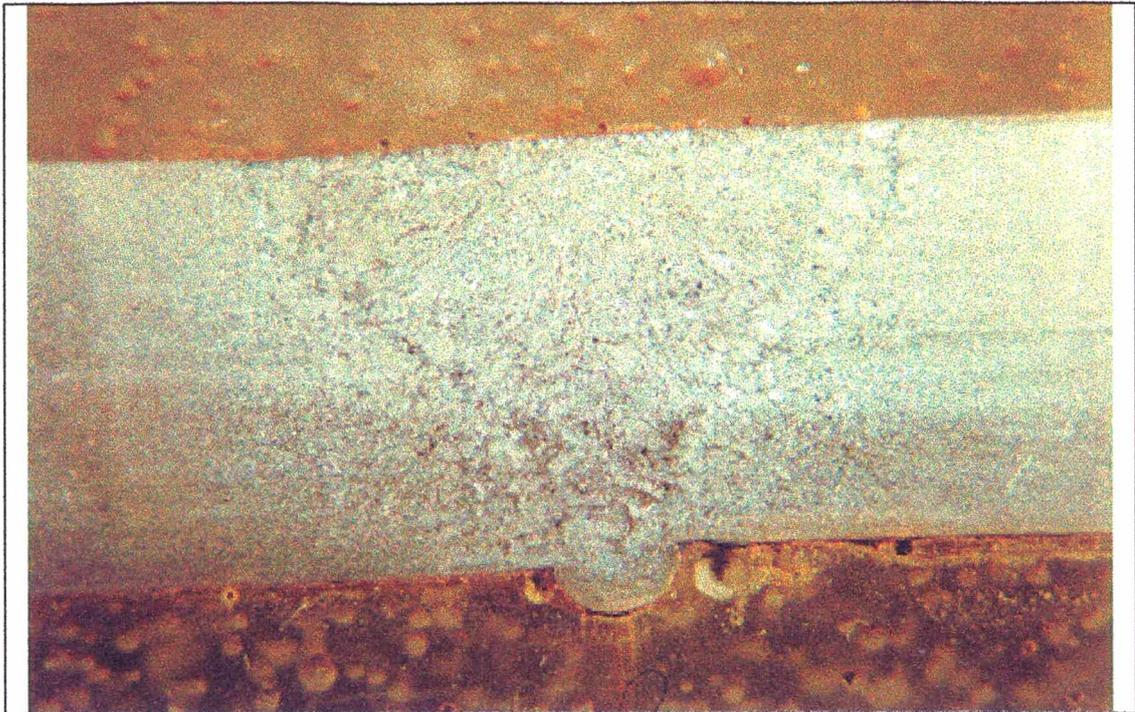
No caso da tensão, para uma DTP de 2 mm ela ficou em torno de 30 V e para a maior DTP utilizada (10 mm), a tensão foi de 35,6 V.



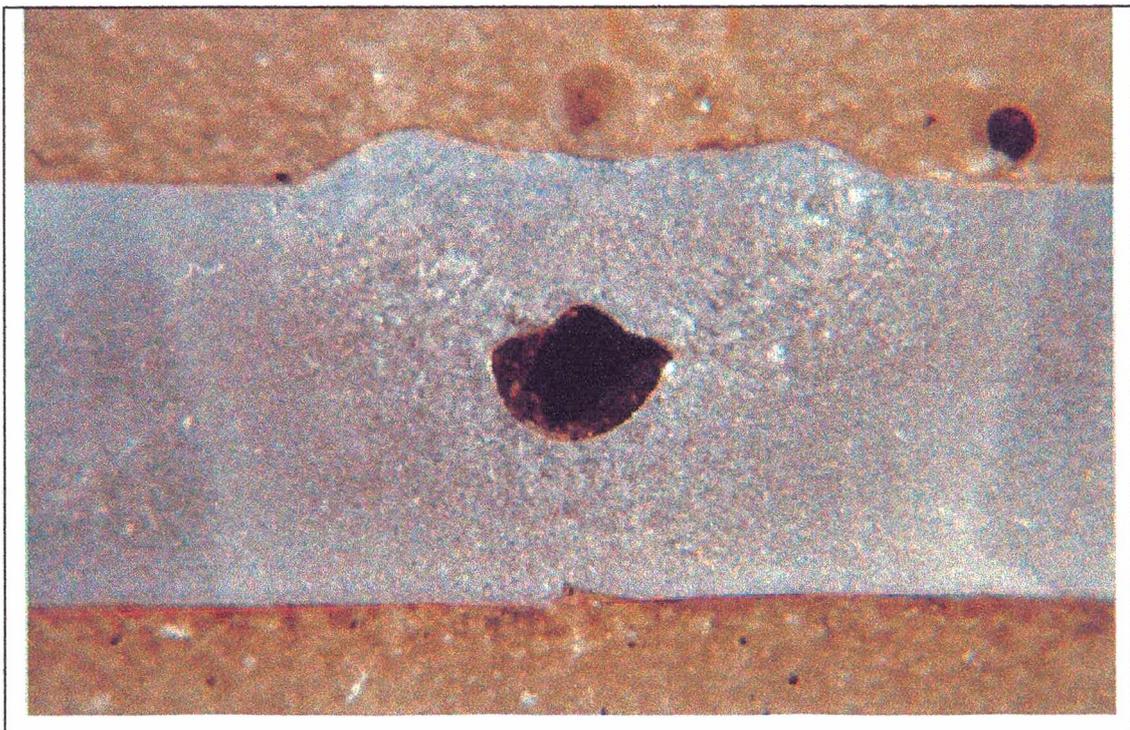
**Figura 18 - Macrografia da solda utilizando uma DTP de 2,0 mm.**



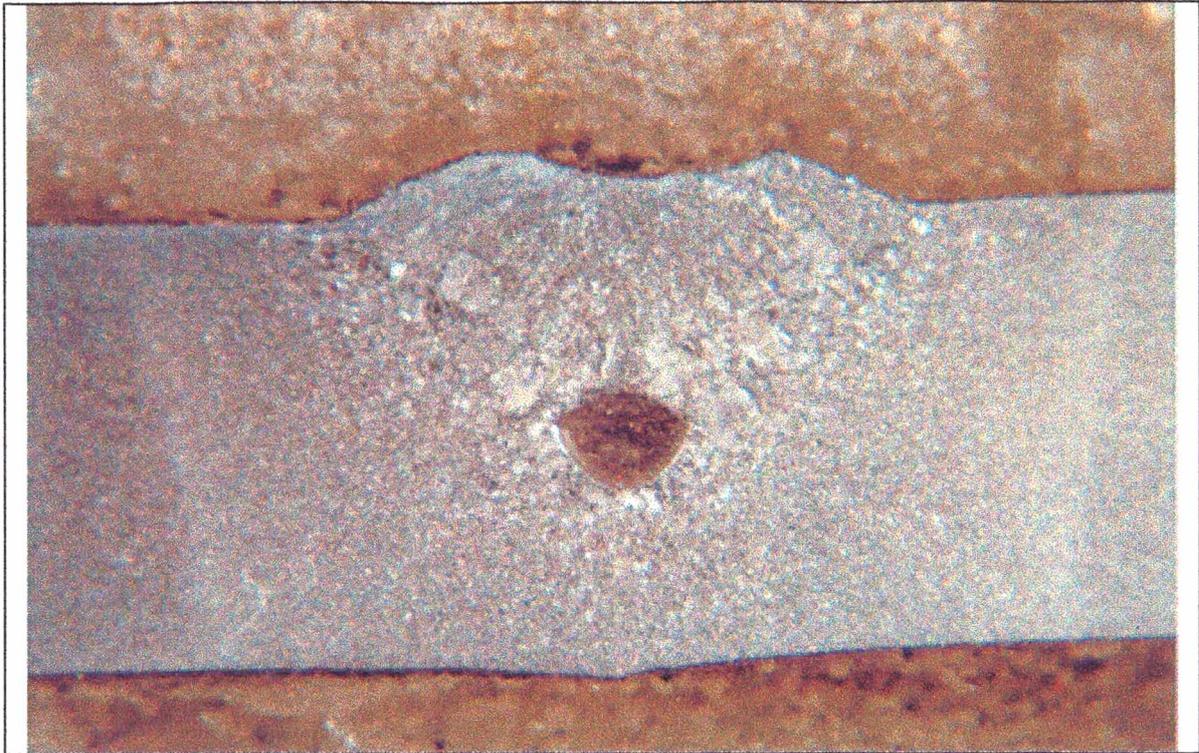
**Figura 19 - Macrografia da solda utilizando uma DTP de 4,0 mm.**



**Figura 20 - Macrografia da solda utilizando uma DTP de 6,0 mm.**



**Figura 21 - Macrografia da solda utilizando uma DTP de 8,0 mm.**



**Figura 22 - Macrografia da solda utilizando uma DTP de 10,0 mm.**

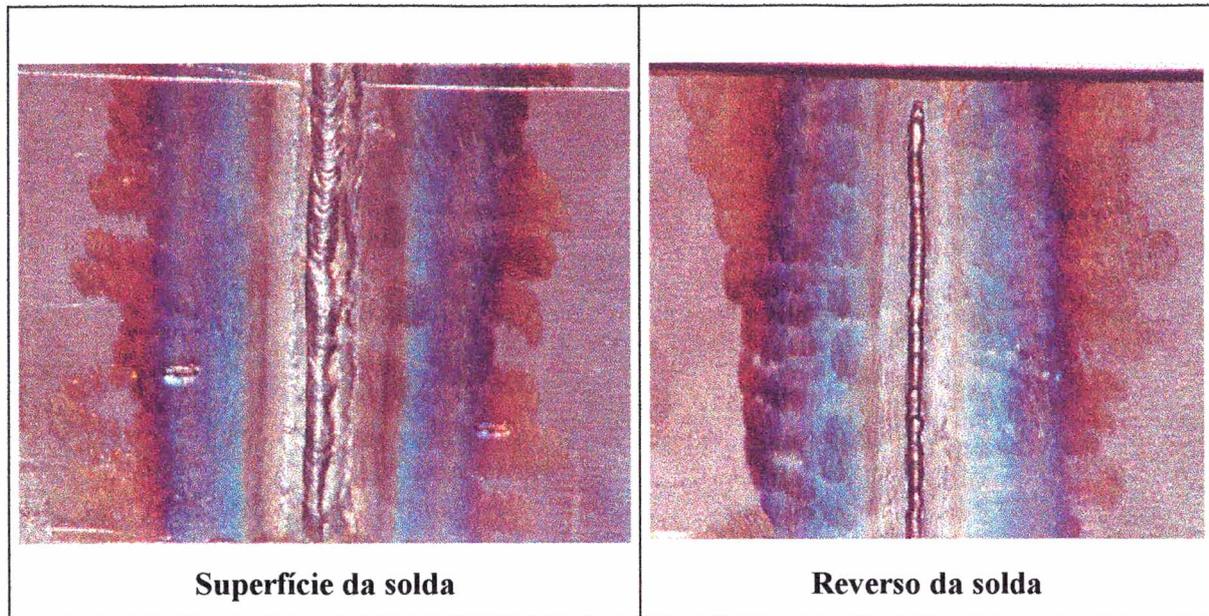
### **6.3 - Influência da Vazão do Gás de Proteção**

A verificação da influência da vazão do gás de proteção pode ser feita comparando-se o aspecto visual das soldas mostradas nas figuras 23 a 27. Para a menor vazão de gás utilizada neste estudo, que foi de 4,0 l/min, nota-se que a solda apresenta irregularidades na forma, com característica de formação de uma depressão acentuada ao longo de toda sua extensão. Entretanto, a raiz da solda se apresentou isenta de falhas. Este mesmo efeito foi notado para a proteção da solda empregando uma vazão de 12 l/min, conforme pode ser observado na figura 27. Nesta condição uma intensa turbulência e instabilidade do keyhole foi verificada, induzidas provavelmente pela excessiva vazão do gás.

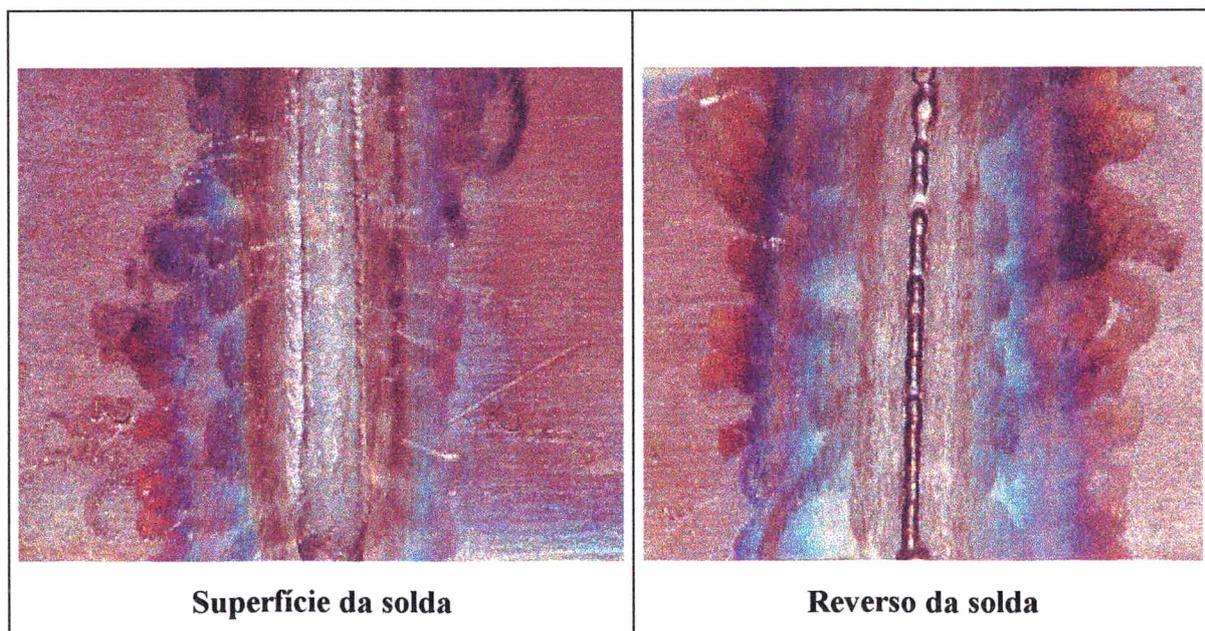
Uma adequada proteção da solda foi obtida para as vazões de 6,0; 8,0 e 10 l/min. Percebe-se nas figuras 24 a 26 que não só a raiz das soldas se mostraram uniformes e com ausência de defeitos, bem como as superfícies das mesmas.

Além das vazões adotadas no item 5.4.2 (c), utilizou-se vazões de 5,0 e 11,0 l/min, mantendo-se os mesmos procedimentos de soldagem, e foram realizados testes para verificar o efeito

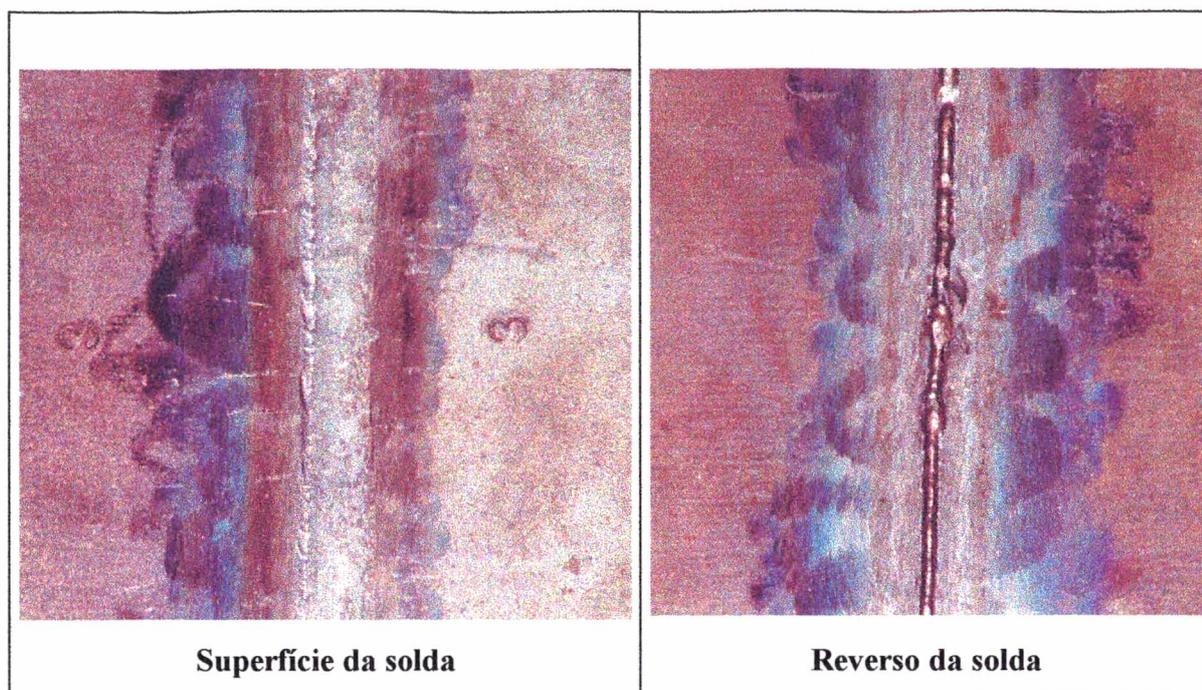
da vazão do gás de proteção. Para ambos os casos foi verificada a depressão na superfície da solda, porém houve uma pequena redução na forma e dimensão da descontinuidade.



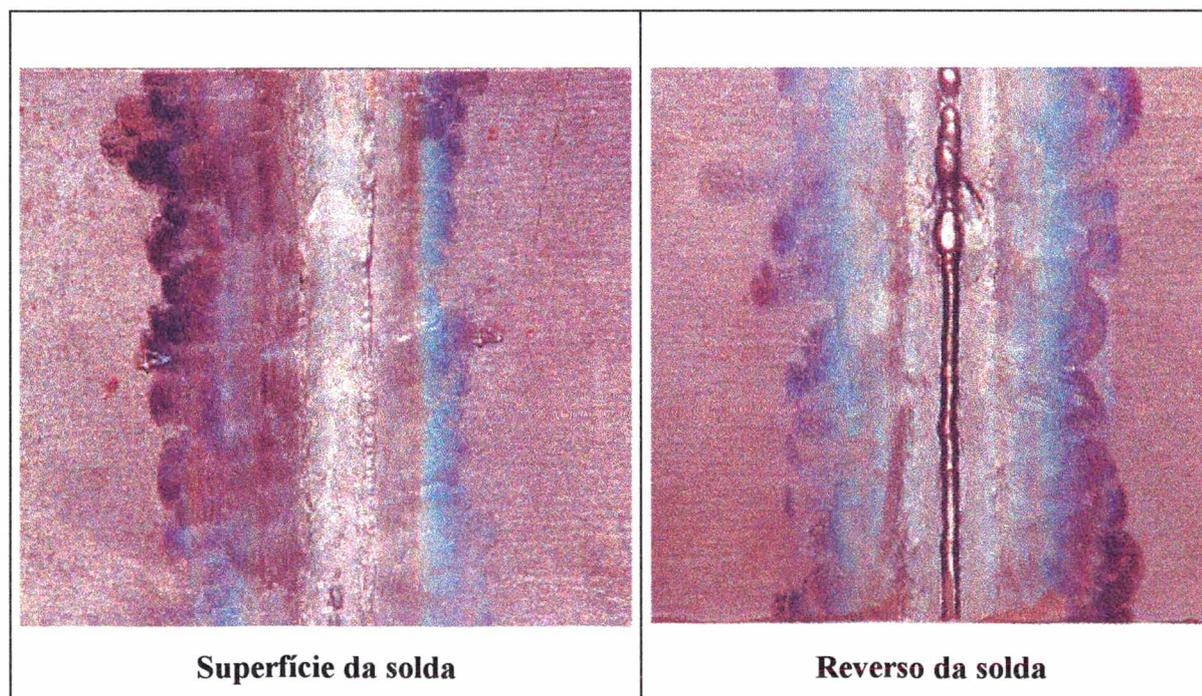
**Figura 23 - Aspecto visual da solda. Gás de proteção: Argônio a 4,0 l/min.**



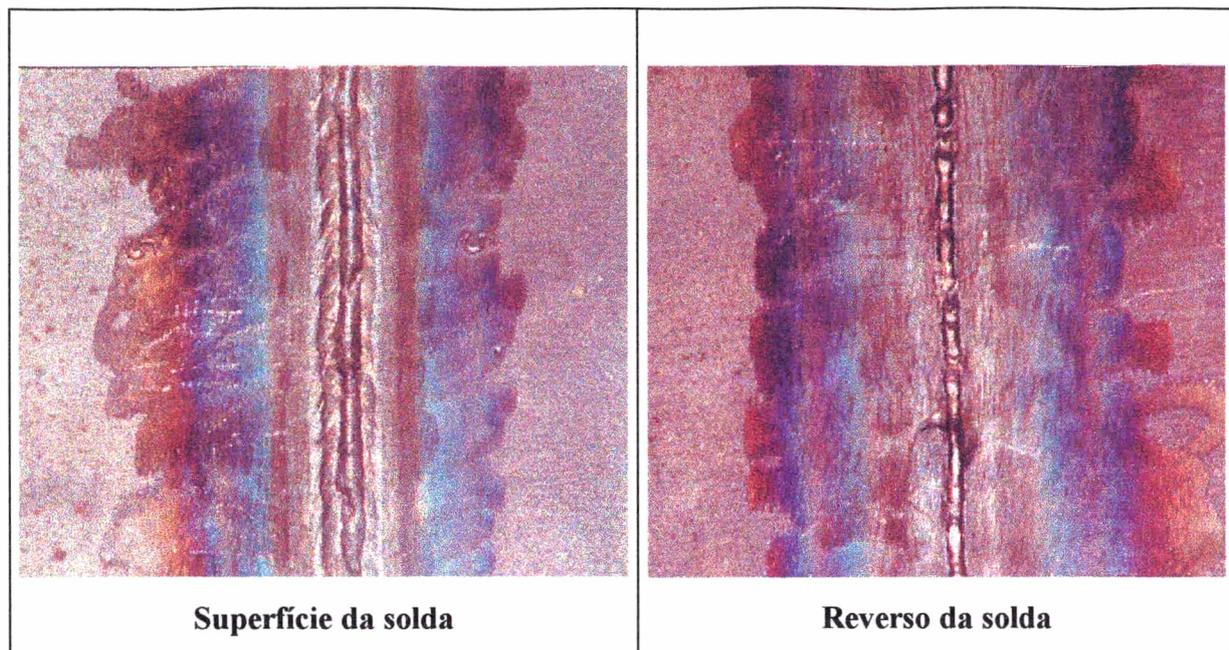
**Figura 24 - Aspecto visual da solda. Gás de proteção: Argônio a 6,0 l/min.**



**Figura 25 - Aspecto visual da solda. Gás de proteção: Argônio a 8,0 l/min.**



**Figura 26 - Aspecto visual da solda. Gás de proteção: Argônio a 10,0 l/min.**



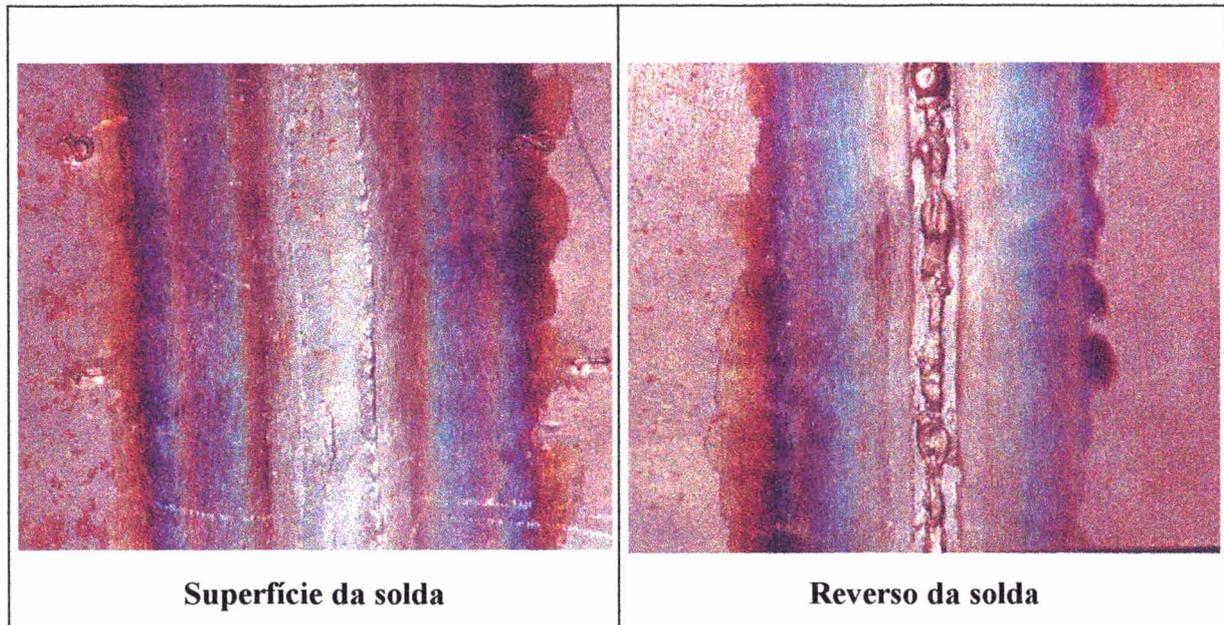
**Figura 27 - Aspecto visual da solda. Gás de proteção: Argônio a 12,0 l/min.**

#### **6.4 - Influência da Vazão do Gás de Plasma**

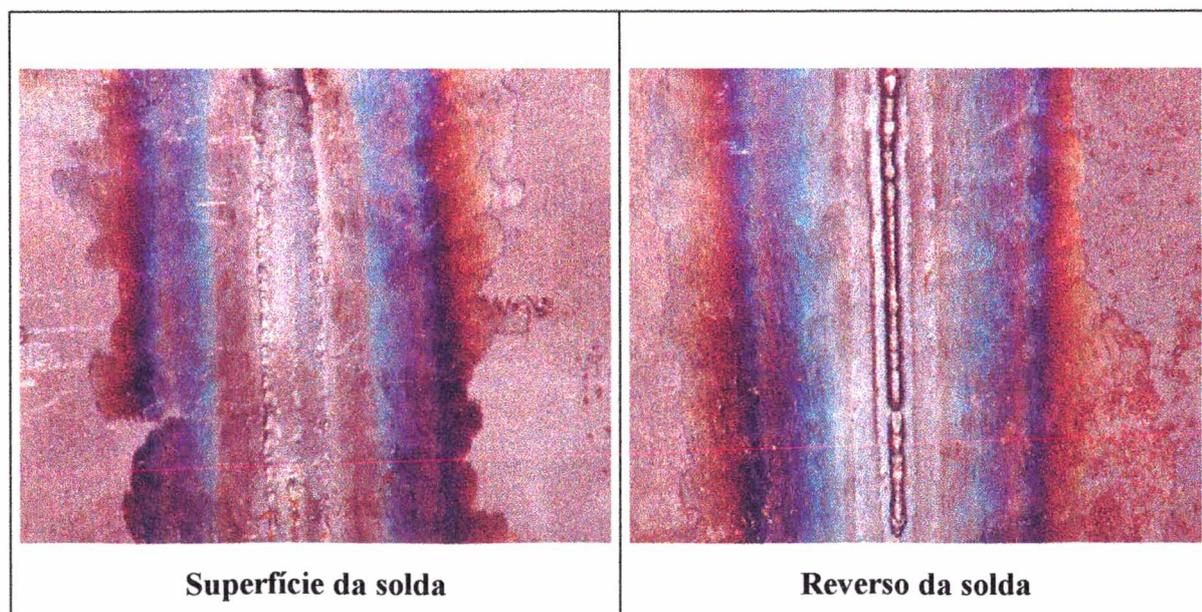
Constatou-se neste estudo que a vazão do gás de plasma tem uma forte influência no comportamento da poça de fusão, na aparência da solda e principalmente sobre o reforço de sua raiz. Isto pode ser facilmente verificado comparando-se as características das soldas apresentadas nas figuras 28 a 31. Para uma vazão de 0,8 l/min observa-se que, embora tenha ocorrido o keyhole, o reforço na raiz não se apresentou efetivamente uniforme e regular. Percebe-se que em alguns pontos houve uma tendência à não ocorrência de penetração total, o que proporcionou uma raiz de aspecto irregular. Já a solda mostrada na figura 29, onde se utilizou uma vazão de 1,2 l/min, apresenta um reforço na raiz bem mais homogêneo e dentro dos níveis de aceitação estabelecidos por norma. Para as vazões superiores utilizadas nesta análise, obteve-se um excessivo reforço na raiz, ocasionado provavelmente pela maior força do jato de plasma, que se mostrou diretamente proporcional ao aumento da vazão do gás. Nestes casos, as soldas realizadas não atenderam aos critérios de aceitação estabelecidos pela norma BS 5500 [51], pois em alguns pontos ao longo da raiz o reforço apresentou-se maior que 1 mm, que é o máximo permitido pela norma.

Importante observar que os experimentos confirmam a citação de Bennett [38], que afirma que pequenas variações na vazão do gás de plasma causam significantes alterações na solda.

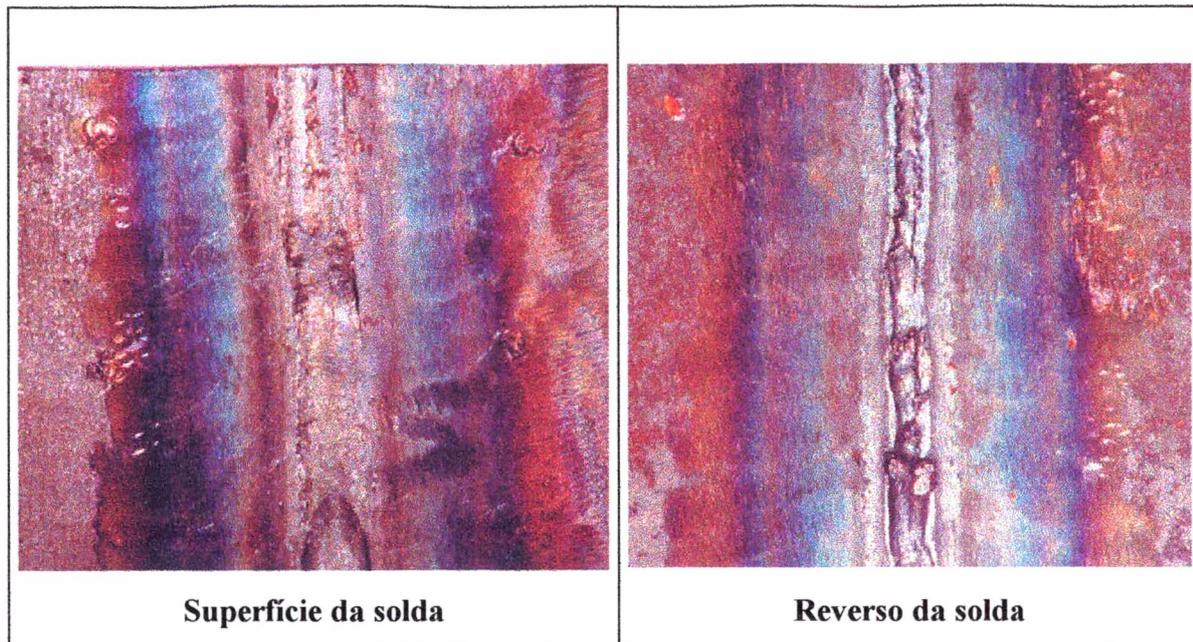
Para se conseguir uma solda de bom aspecto e qualidade basta adequar a vazão à uma velocidade de soldagem e corrente compatíveis com a mesma.



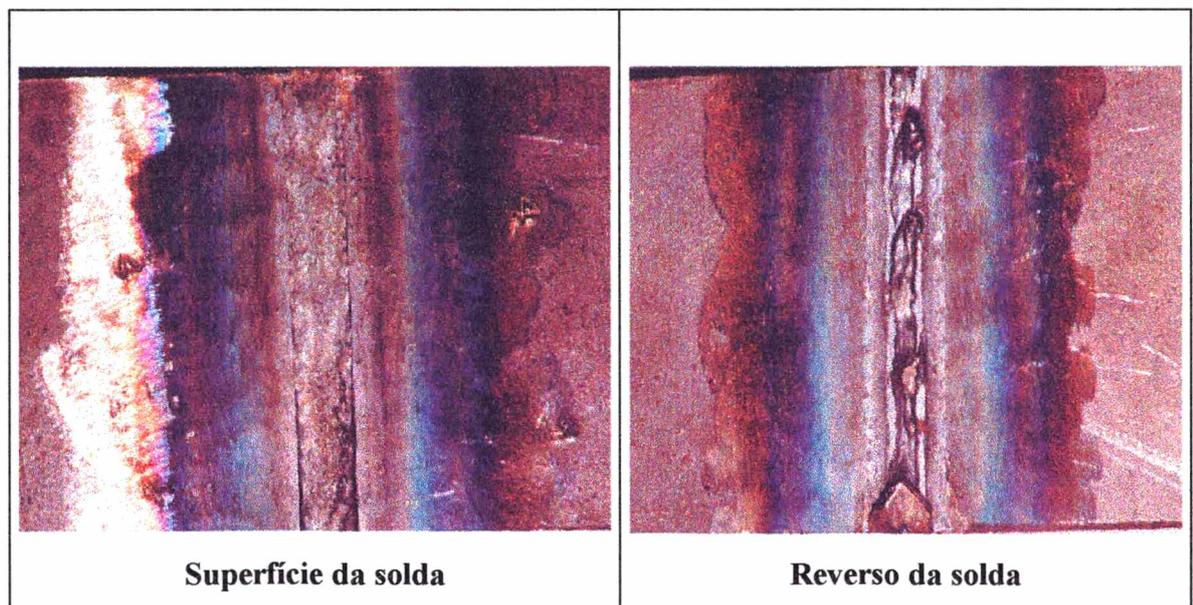
**Figura 28 - Aspecto visual da solda. Gás de plasma: Argônio a 0,8 l/min.**



**Figura 29 - Aspecto visual da solda. Gás de plasma: Argônio a 1,2 l/min.**



**Figura 30 - Aspecto visual da solda. Gás de plasma: Argônio a 1,7 l/min.**



**Figura 31 - Aspecto visual da solda. Gás de proteção: Argônio a 2,2 l/min.**

## 6.5 - Influência do Ângulo do Eletrodo

Na verificação da influência do ângulo da ponta do eletrodo sobre a solda também foi aplicado o teste F. Desta forma pôde-se verificar se o ângulo tendeu ou não a afetar a geometria da solda, especialmente a largura e o reforço na raiz. Para os ângulos de ponta de 15°, 30° e 45° foram efetuadas soldas onde mediu-se 10 valores de reforço na raiz e largura da solda. Estes valores estão apresentados nas tabelas 10 e 11. Foi procedido o cálculo das médias e desvios padrões de cada amostra (15° a 45°), e também a média global. Posteriormente foram calculadas a variação entre as amostras ( $Se^2$ ) e a variação residual ( $Sr^2$ ). Aplicou-se então, o teste F. Foi adotado um nível de significância de 1%.

Com relação ao reforço na raiz, verificou-se que  $F_{cal}$  foi menor que  $F_{crit}$  ( $1,08 < 8,02$ ). Estes dados podem ser vistos na tabela 12. Demonstra-se que não há diferenças significativas entre as amostras. Portanto, o ângulo da ponta do eletrodo tende a não afetar o reforço na raiz.

No caso da largura da solda, nota-se que  $F_{cal}$  foi maior que o  $F_{crit}$  ( $10,64 > 8,02$ ), o que indica que neste caso, o ângulo exerceu uma certa influência, pois houve diferenças significativas entre as amostras. Os resultados desta análise demonstram que para o processo plasma o ângulo do eletrodo tende a exercer uma influência sobre a solda com efeito contrário ao que se verifica no processo TIG, que conforme já visto no capítulo 4 é similar ao plasma. Em geral, no TIG quanto mais obtuso o ângulo do eletrodo há uma maior tendência a se obter um aumento da penetração e redução na largura [7]. Entretanto, estes resultados citados na literatura podem ser alterados, pois também há uma influência da composição química do metal de base.

Um fato que marcou a realização destes experimentos foi a não abertura do arco piloto quando se utilizou o ângulo de ponta igual a 60°. Foi observado que o arco não conseguia partir e circundava a região lateral do eletrodo que se encontrava mais próxima da saída do bocal constritor.

	Reforço na raiz		
	15°	30°	45°
	0,75	0,90	0,80
	0,75	0,75	0,75
	0,70	0,90	0,80
	0,70	0,80	0,80
	0,70	0,80	0,80
	0,65	0,65	0,75
	0,65	0,80	0,60
	0,80	0,80	0,75
	0,70	0,75	0,65
	0,70	0,70	0,75
<b>Média (<math>\bar{x}</math>)</b>	0,71	0,79	0,75
<b>Desvio padrão (<math>\sigma</math>)</b>	0,05	0,08	0,07
<b>Média total (<math>\bar{x}_t</math>)</b>	0,75		

Tabela 10 - Dados levantados e calculados em relação ao reforço na raiz para análise do efeito do ângulo do eletrodo sobre a solda.

	Largura da solda		
	15°	30°	45°
	9,80	9,40	9,40
	9,80	9,40	9,00
	9,60	9,40	9,40
	9,60	9,80	9,40
	9,70	9,70	9,00
	9,80	9,70	9,20
	9,70	9,70	9,00
	9,70	9,60	9,00
	9,70	9,40	9,40
	9,80	9,50	9,20
<b>Média (<math>\bar{x}</math>)</b>	9,72	9,56	9,20
<b>Desvio padrão (<math>\sigma</math>)</b>	0,08	0,16	0,19
<b>Média total (<math>\bar{x}_t</math>)</b>	9,49		

Tabela 11 - Dados levantados e calculados em relação à largura da solda para análise do efeito do ângulo do eletrodo sobre a solda.

		Largura da solda	Reforço na raiz
Varição entre amostras	Se <sup>2</sup>	0,709	0,014
Varição residual	Sr <sup>2</sup>	0,0667	0,013
	Fcal	10,64	1,08
	Fcrit	8,02	8,02

**Tabela 12 - Dados calculados para aplicação do teste F na análise da influência do ângulo do eletrodo.**

## 6.6 - Levantamento da Faixa de Trabalho de Variáveis e Parâmetros

Sabia-se de antemão que proceder o levantamento da área de trabalho de variáveis e parâmetros para soldagem plasma pela técnica keyhole seria uma tarefa extremamente árdua pois, pequenas variações nos parâmetros/variáveis que mais influenciam no processo comprometem a qualidade da solda. Estes parâmetros foram apresentados no capítulo 3. Por outro lado, é importante e fundamental que se tenha estabelecida uma área de trabalho, mesmo que estreita, pois com isso se pode chegar a procedimentos específicos e particulares com maior rapidez.

Conforme visto no item 5.4.2 (f), o material de base utilizado para o levantamento desta área foi o aço ABNT 1020 de 4,8 e 6,35 mm de espessura. Foram utilizados bocais constritores com diâmetro do orifício igual a 2,8 e 3,2 mm, respectivamente. Cuidou-se, a exemplo do que foi feito com os demais experimentos, para que não se utilizassem bocais que já estivessem com o orifício constritor danificado, pois este é um fator que altera a característica da solda [10].

Os valores obtidos no levantamento final da área de trabalho estão representados nas figuras 32 e 33, para espessuras de 4,8 e 6,35 mm, respectivamente. Procurou-se variar a corrente de soldagem (I) e a velocidade de soldagem (Vs) mantendo-se fixo todos os demais parâmetros/variáveis, conforme procedimento descrito em 5.4.2 (f). O critério para definir os limites de I e Vs foi o de trabalhar até quando a solda e a continuidade do processo fossem afetadas.

As figuras 32 e 33 são formadas basicamente por pontos e por marcações em X, além de uma área hachurada. Os pontos e as marcações representam as condições de soldagem que foram testadas e a área em destaque indica a área de trabalho recomendada. Na figura 32 observa-se dois pontos em evidência. Eles foram destacados para que se pudesse demonstrar a alternativa que pode ser empregada para obter uma solda de qualidade. Percebe-se que os dois pontos, que representam distintas condições de soldagem se encontram fora da área de trabalho estabelecida. Para ambos os

casos, ocorreu a falta de penetração total, ou seja, não foi estabelecido o keyhole. Porém, repetindo-se estes experimentos e tomando-se como base os mesmos parâmetros/variáveis de soldagem, tendo-se alterado apenas a vazão do gás de plasma de 1,2 l/min para 1,6 l/min, verificou-se que a solda foi muito boa, com a obtenção do keyhole e conseqüentemente, de penetração total e uniforme.

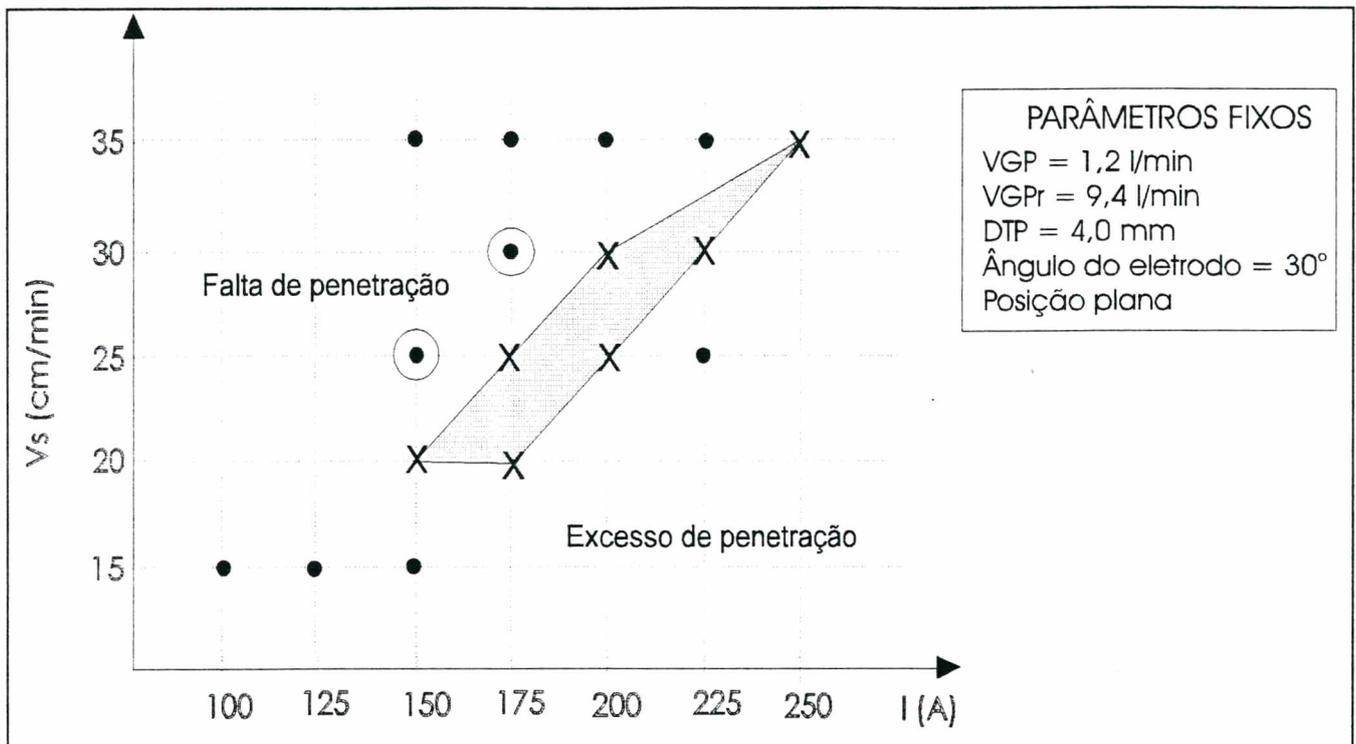


Figura 32 - Área de trabalho da velocidade e corrente de soldagem ( $e = 4, 8$  mm).

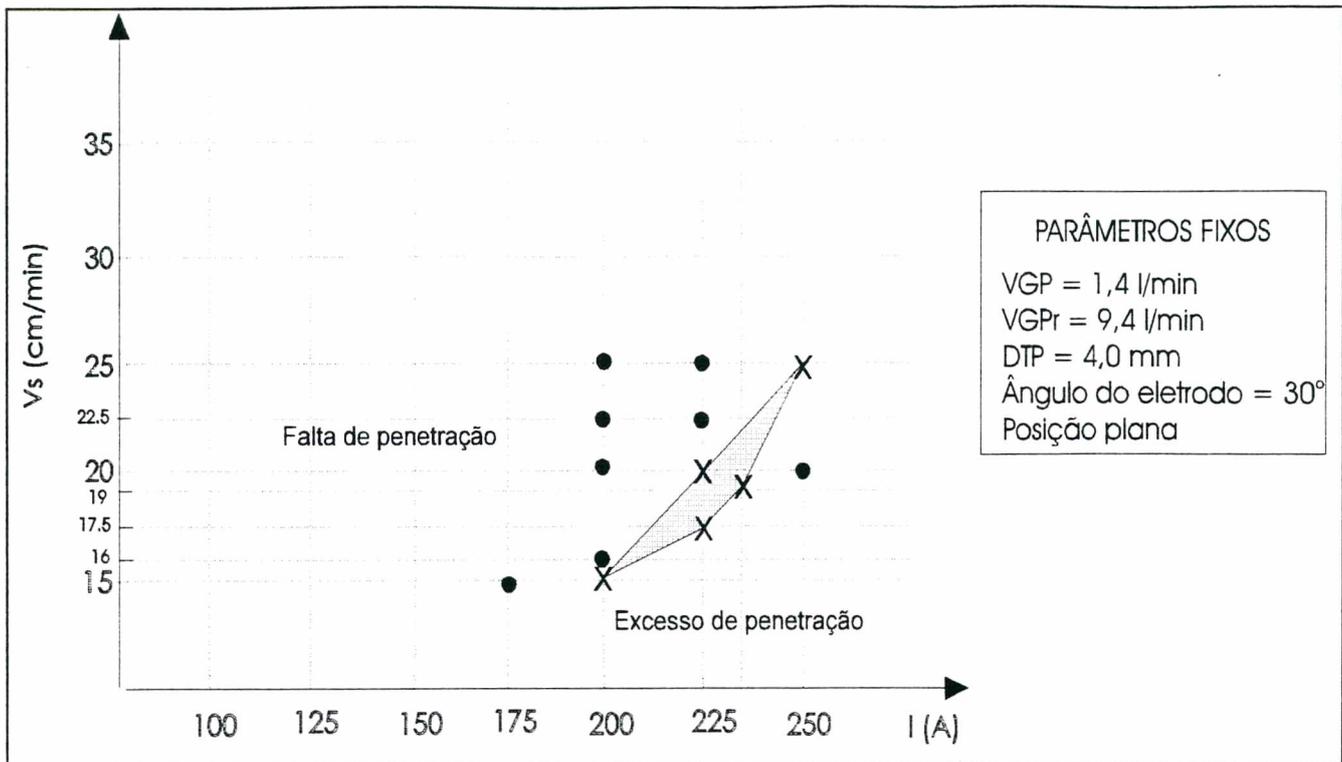


Figura 33 - Área de trabalho da velocidade e corrente de soldagem ( $e = 6,35$  mm).

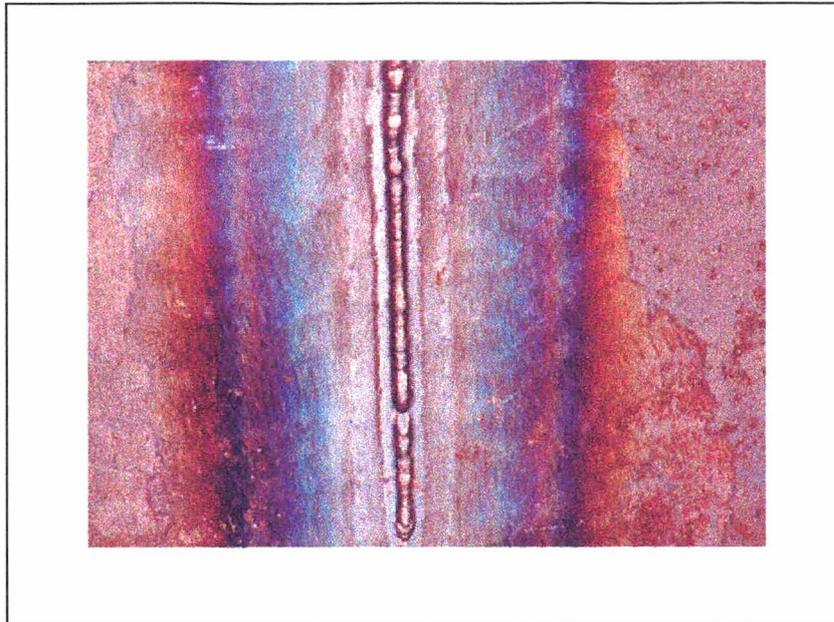
### 6.7 - O Efeito do Gás de Proteção na Raiz da solda (Backing gas)

A exemplo do que se faz na superfície da solda, procurou-se nesta análise proteger com nitrogênio a região reversa da solda (raiz), para que se pudesse verificar o efeito do gás nesta região. Para o aço ABNT 1020 foi notada uma pequena diferença entre as soldas realizadas sem proteção no reverso e as soldas com presença de gás de purga. Verificou-se que a diferença básica apresentada foi com relação à aparência da raiz, que se mostrou mais satisfatória quando se empregou a proteção. Este fato pode ser comprovado observando-se as figuras 34 e 35.

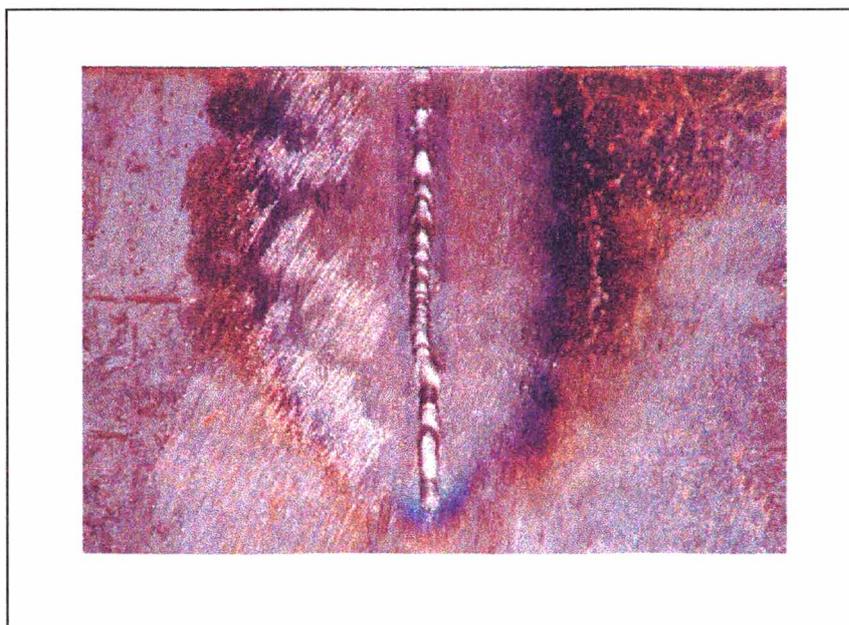
Com relação ao aço AISI 304 e SAE 4340, pode-se perceber, conforme mostrado nas figuras 36 e 37, que há uma maior variação no aspecto da raiz quando se adota ou não a proteção no reverso. Com a proteção se evitou a queima da raiz e foi notado inclusive, que no caso específico do aço inoxidável o keyhole se apresentou mais estável.

Nestes ensaios as soldas apresentaram-se dentro dos critérios de aceitação da norma. Não ocorreram mordeduras e o reforço na raiz não excedeu a 1mm [51].

Entretanto, deve-se ressaltar que estes testes foram realizados baseando-se apenas na observação visual das soldas, sendo necessário a continuidade destes ensaios avaliando-se também a microestrutura e adotando-se diferentes gases ou misturas para se chegar a conclusões mais definitivas.



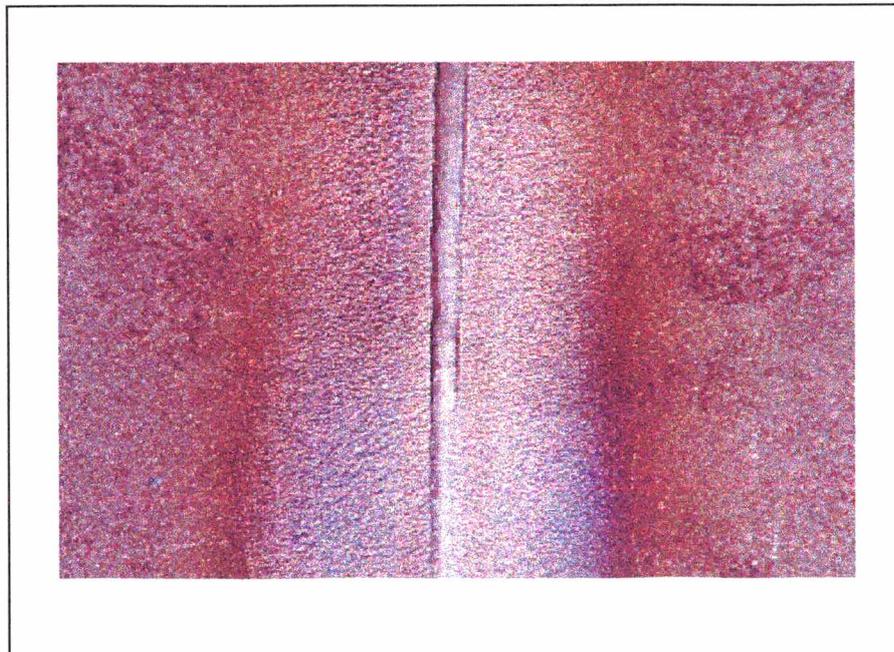
**Figura 34 - Aspecto da raiz da solda. Aço ABNT 1020 de 6,35 mm. Sem proteção no reverso.**



**Figura 35 - Aspecto da raiz da solda. Aço ABNT 1020 de 6,35 mm. Com proteção no reverso.**



**Figura 36 - Aspecto da raiz da solda. Aço AISI 304 de 4,8 mm. Sem proteção no reverso. Ampliação: 10X.**



**Figura 37 - Aspecto da raiz da solda. Aço SAE 4340 de 4,0 mm. Com proteção no reverso.**

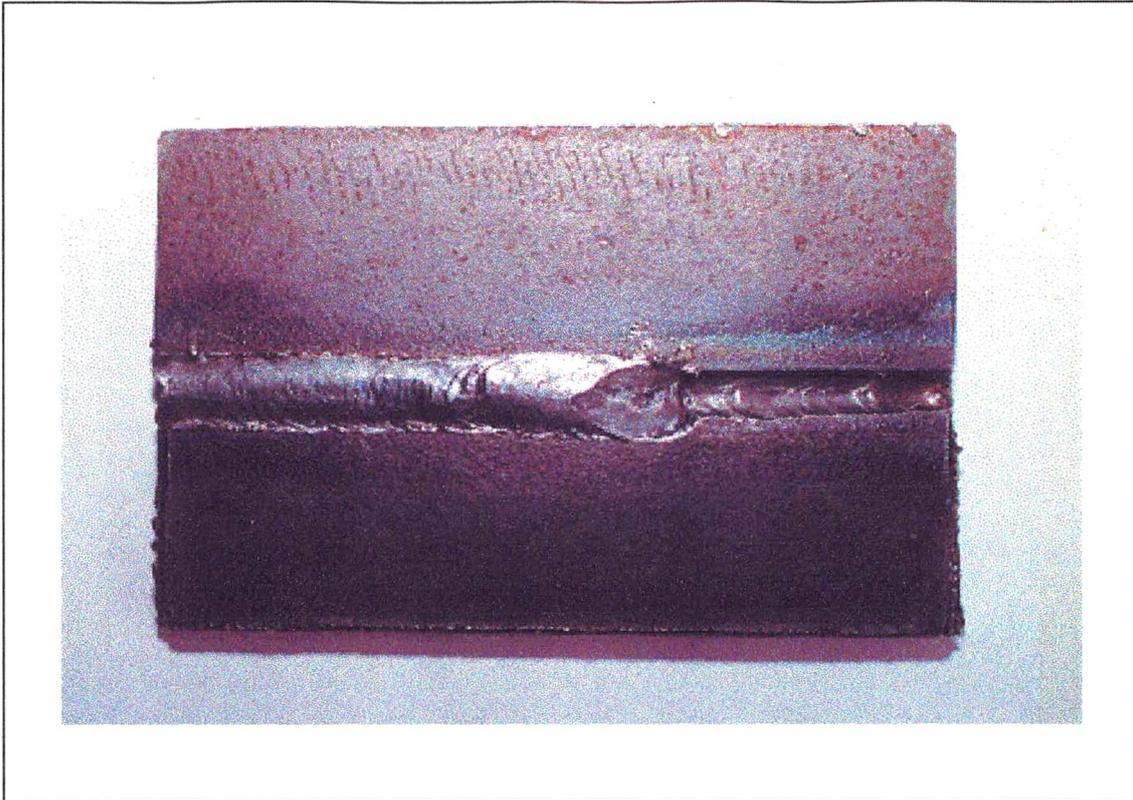
## 6.8 - Passe de raiz em chapas espessas com chanfro em V

Foram realizados passes de raiz em chapas de maior espessura, preparadas com chanfro em V, seguindo o procedimento descrito no item 5.4.2 (h).

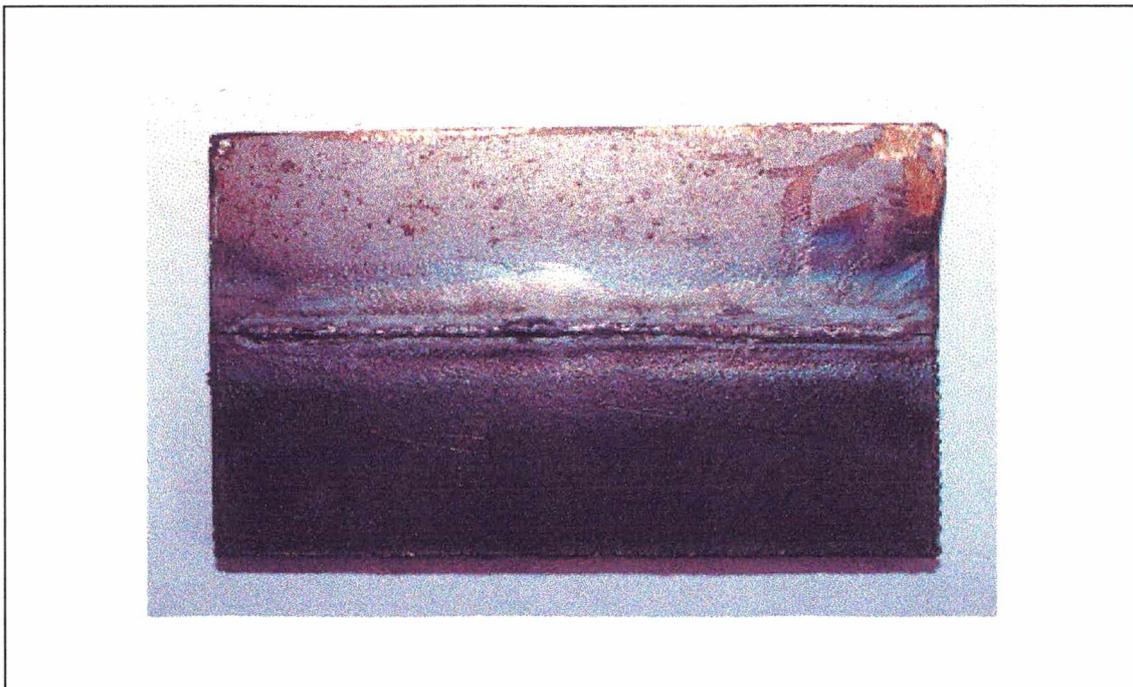
Os resultados obtidos são apresentados nas figuras 38 a 42. Nas figuras 38 e 39 observa-se o corpo de prova de 10,0 mm de espessura soldado em dois passes: o primeiro de raiz utilizando o processo plasma, e o segundo de enchimento, efetuado com o processo MIG com transferência por spray. A penetração na raiz foi perfeita, sendo que a obtenção do keyhole e sua manutenção durante a soldagem se mostraram satisfatórias. Os mesmos resultados foram alcançados quando se soldou o corpo de prova de 25,4 mm. Neste porém, foi efetuado apenas o passe de raiz. As figuras 40 e 41 ilustram o corpo de prova soldado.

Percebe-se que o processo plasma também pode ser utilizado com êxito em chapas de maior espessura, com a configuração da junta em V, e com certeza com consideráveis ganhos de produtividade pois, empregando apenas o processo MIG ou TIG provavelmente seriam necessários mais passes para o completo preenchimento da junta. É importante ressaltar que se pode reduzir o ângulo da junta, que nestes experimentos foram mantidos em 90° em virtude da geometria do bocal da tocha utilizada. Com isso, reduz-se ainda mais o número de passes para o completo preenchimento da junta. Nos experimentos realizados não foi possível reduzir o ângulo de abertura da junta pois, adotando-se ângulos menores, a distância tocha-peça aumentaria, atingindo valores que influenciariam nos resultados.

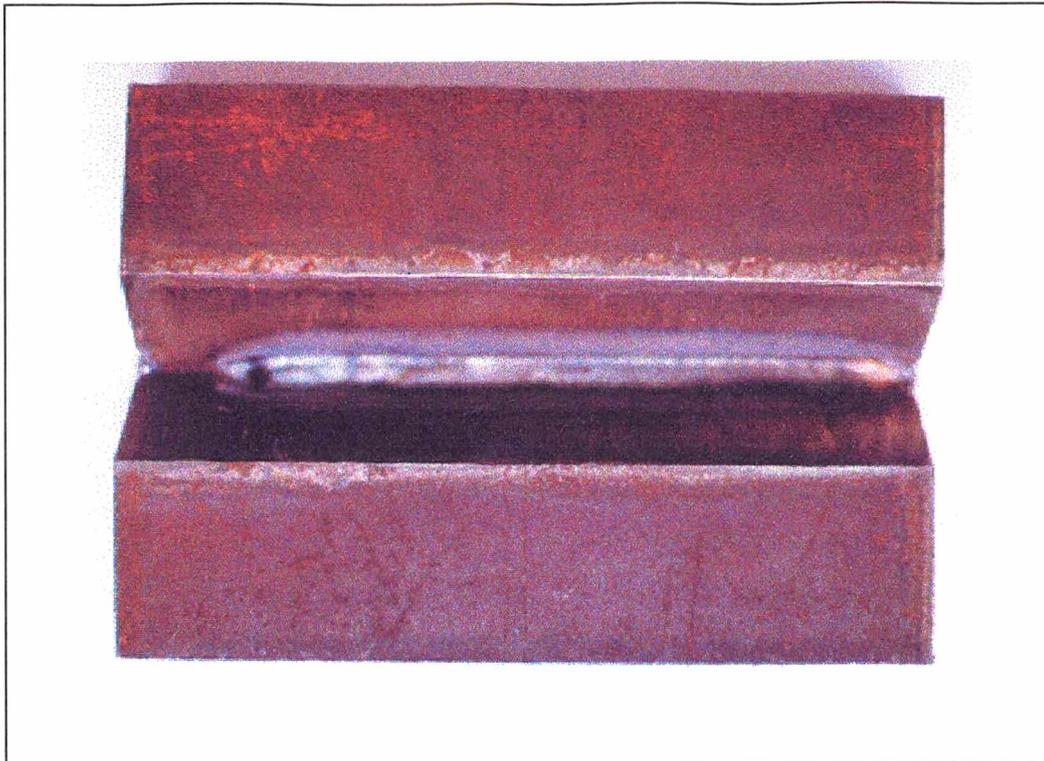
Na figura 42 tem-se a macrografia do corpo de prova de 10,0 mm soldado com o passe de raiz e o posterior passe de enchimento. Percebe-se a ausência de defeitos na solda efetuada, como poros ou trincas. Na região central da junta percebe-se uma linha transversal contínua e interrompida apenas na zona fundida. Isto caracteriza uma estrutura bandeada no centro da chapa. Esta estrutura provavelmente se formou durante o processo de laminação da chapa devido a segregação de Mn, que é favorecida pela baixa velocidade de resfriamento no centro da chapa. A presença da estrutura bandeada na maioria dos casos tem pouco ou nenhum efeito negativo nas propriedades dos materiais em serviço [58].



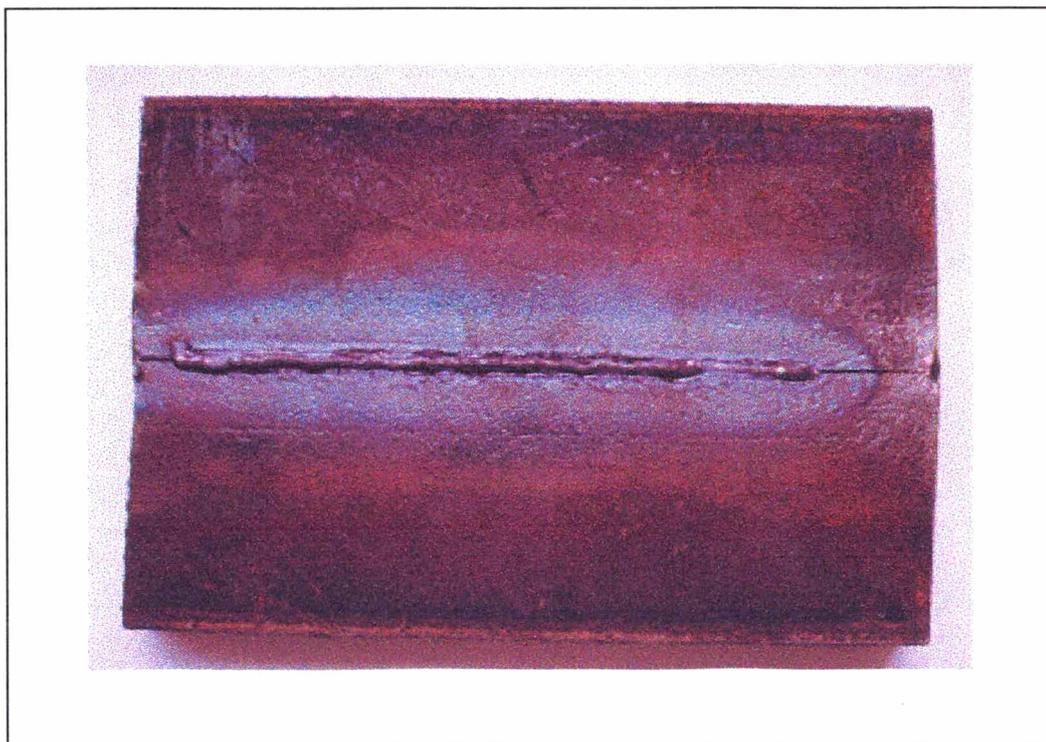
**Figura 38 - Aspecto superficial do corpo de prova soldado. Aço ABNT 1020 de 10 mm, chanfro em V. O primeiro passe de raiz e o passe posterior de enchimento.**



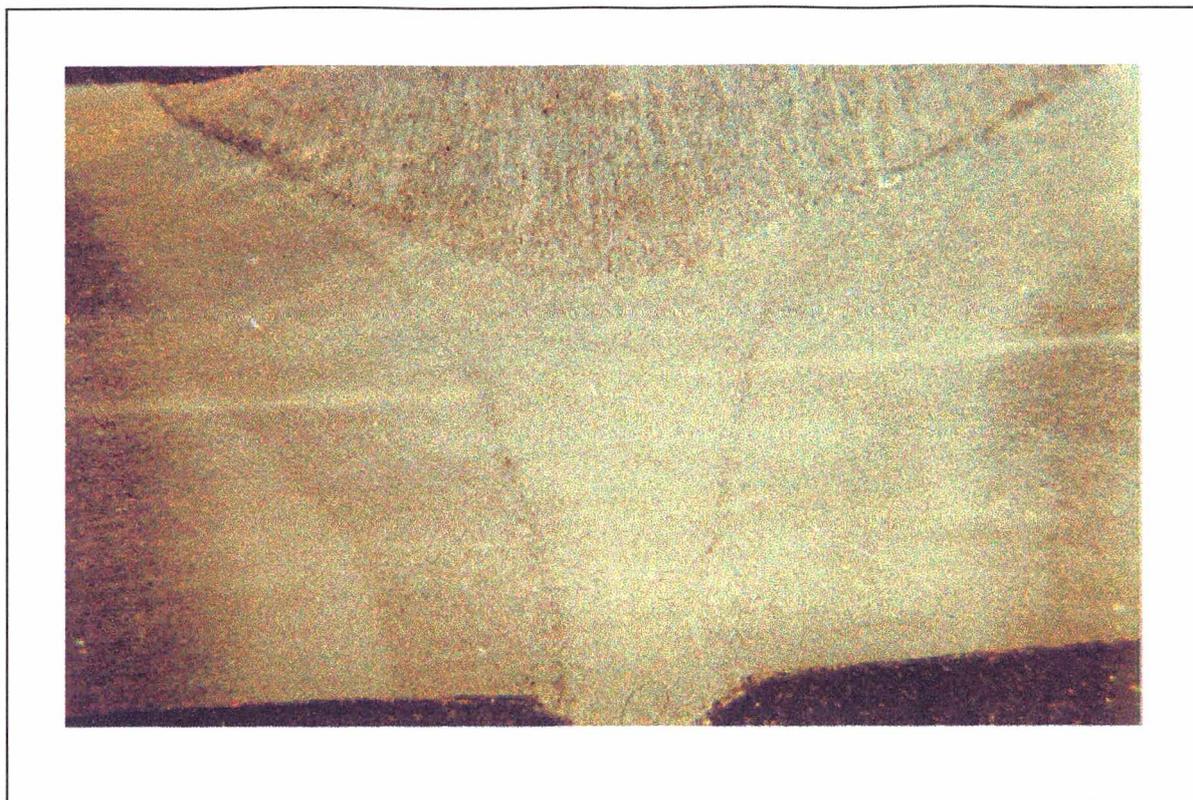
**Figura 39 - Aspecto da raiz da solda. Aço ABNT 1020 de 10,0 mm, chanfro em V.**



**Figura 40 - Aspecto superficial do corpo de prova soldado. Aço ABNT 1020 de 25,4 mm, chanfro em V. Detalhe superficial da raiz.**



**Figura 41 - Aspecto da raiz da solda. Aço ABNT 1020 de 25,4 mm, chanfro em V.**



**Figura 42 - Macrografia da solda do corpo de prova de 10,0 mm, chanfro em V. Ataque com nital a 5%. Ampliação: 10X.**

### **6.9 - Ensaio Mecânico e Radiográfico**

Foram realizados dois tipos de ensaios nas juntas soldadas conforme o procedimento descrito no item 5.4.2 (i). O primeiro ensaio realizado foi o radiográfico, que permite revelar possíveis descontinuidades internas em toda a extensão da solda, tais como poros e/ou trincas. Estas descontinuidades só podem ser corretamente identificadas e reveladas com uma certa margem de segurança através do ensaio radiográfico. No caso da presença de poros torna-se possível se ter uma idéia de seu tamanho. Após o ensaio radiográfico e utilizando as mesmas juntas foi efetuado o segundo ensaio: dobramento transversal de face e de raiz. A análise dos resultados deste ensaio foi baseada na observação visual dos corpos de prova durante e após a realização do mesmo. Os CP's foram dobrados a 180°.

Como era de se esperar, diante dos resultados fornecidos pelo ensaio radiográfico, onde não foram detectadas imperfeições ou presença de poros ou trincas, durante o dobramento transversal de

face e de raiz não foi verificada qualquer fissura superficial nas juntas ensaiadas. Para se certificar da boa ductilidade apresentada pela solda, após o ensaio os CP's foram examinados com uma lupa onde, novamente constatou-se a ausência de fissuras.

Com os mesmos parâmetros/variáveis utilizados para soldar os CP's submetidos aos ensaios de dobramento e radiográfico foram soldados alguns CP's utilizando-se o programa CTA1. A finalidade foi avaliar a influência de um controle de aclave e declive da vazão do gás de plasma sobre a abertura e principalmente o fechamento do keyhole. Ocorre que durante a abertura do keyhole o material fundido tende a ser lançado para trás, em sentido oposto ao deslocamento da tocha de soldagem. Com isto forma-se uma região côncava no início da solda, caracterizada muitas vezes pela ausência de penetração total e de um acúmulo excessivo de material solidificado. Uma descontinuidade um pouco mais acentuada é verificada no término da operação de soldagem, onde o furo do keyhole fica aberto no final da solda.

Utilizando o programa CTA1, cuja forma básica da rampa de gás fornecida para o controle da vazão é apresentada na figura 43, pôde-se perceber que no final das soldas, especialmente na região de fechamento do keyhole foram alcançados bons resultados. A figura 44 retrata corpos de prova submetidos a duas condições: uma onde não se teve o controle da vazão e outra, onde foi efetuado o controle. Verifica-se que há realmente uma significativa diferença quando é empregada a rampa de gás. O furo característico do keyhole, que é facilmente identificado quando não se utiliza a rampa, é fechado e, em seu lugar fica uma suave depressão no final da solda que diminui gradativamente à medida que a corrente de soldagem e a vazão do gás de plasma decaem de acordo com o programado na rampa. A rampa de corrente foi ajustada manualmente em potenciômetros no painel da INVERSAL 300. Nos experimentos foram adotados valores iguais (5 s), tanto para aclave, quanto para declive da corrente. Com relação ao fechamento do keyhole, os melhores resultados foram obtidos adotando-se um tempo de descida da vazão do gás de plasma maior que o tempo de decaimento da corrente. Com tempos menores, o furo era reduzido, mas não se fechava por completo. Com relação a abertura do keyhole, no início da soldagem, não foram alcançados bons resultados.

Cabe ressaltar que para se chegar a conclusões mais precisas é necessário que se realize um número maior de testes, mas fica evidenciado que realmente o controle da vazão do gás de plasma é fundamental para a abertura e principalmente para o adequado fechamento do keyhole.

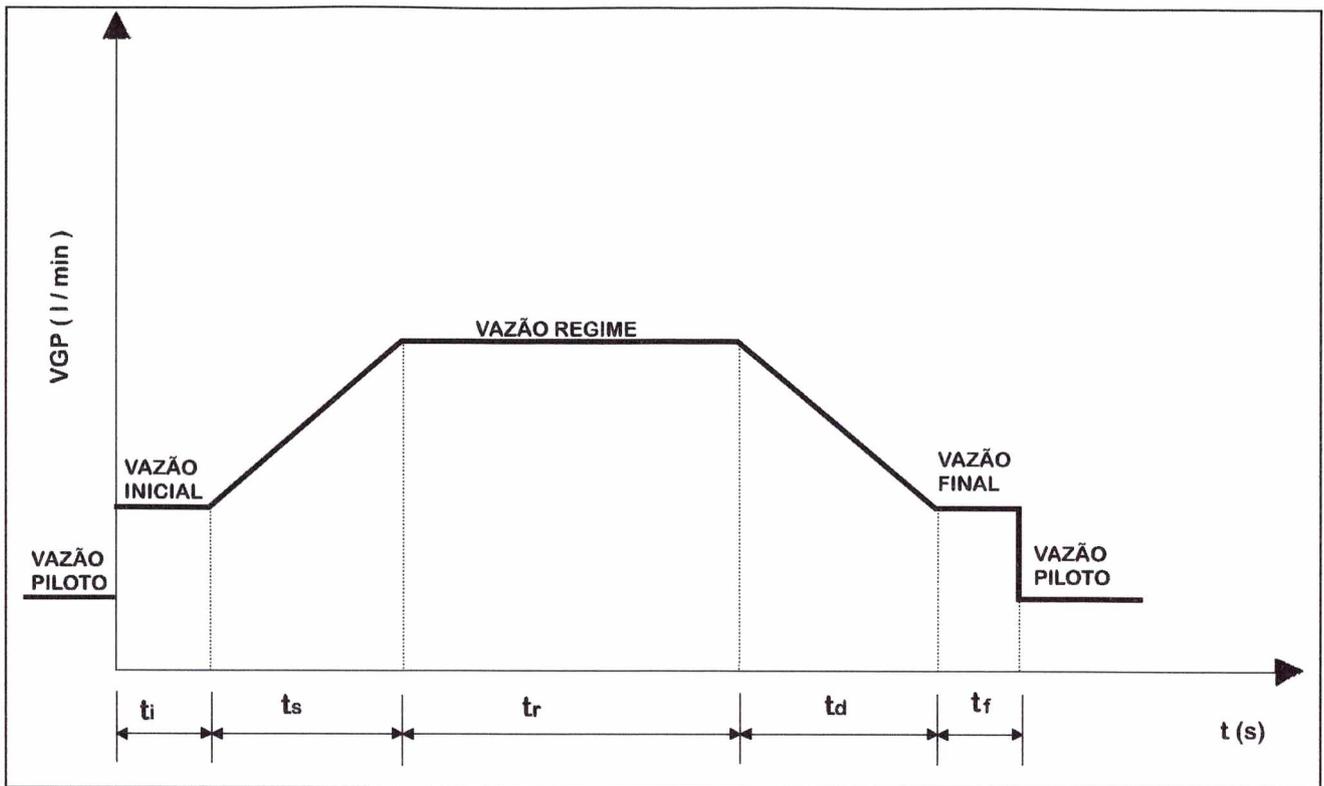


Figura 43 - Forma descrita pela vazão do gás de plasma durante o controle.

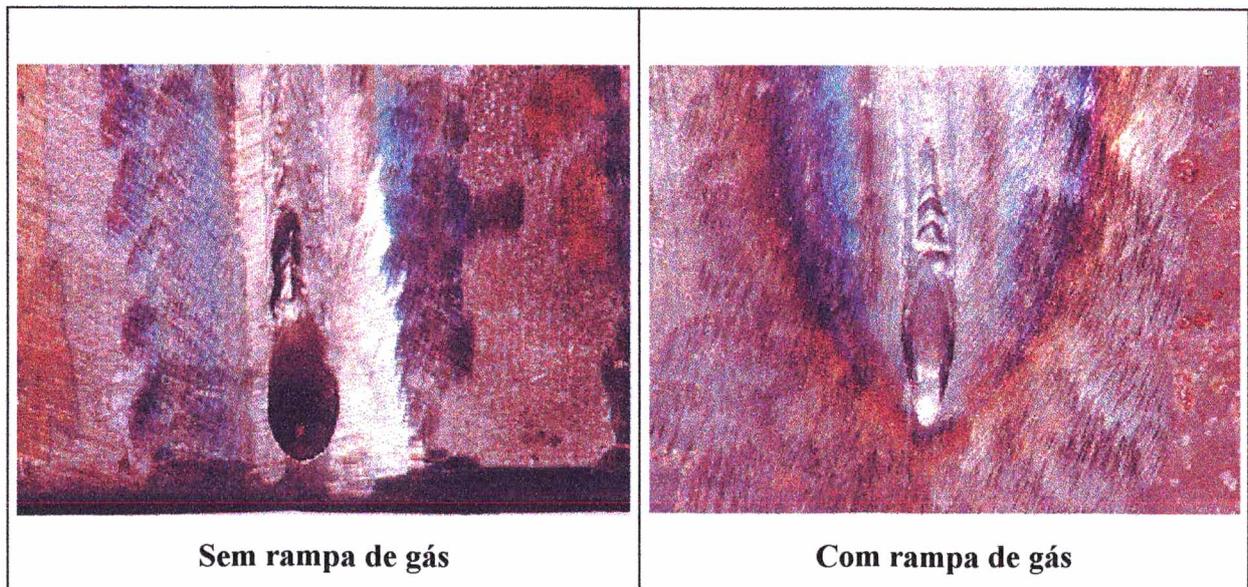


Figura 44 - Soldas para análise da influência do controle da vazão do gás de plasma. Aspecto superficial.

## 6.10 - Corrente pulsada

A maior parte dos experimentos realizados neste trabalho foram efetuados na posição plana e utilizando-se a corrente constante. Mesmo assim decidiu-se realizar alguns experimentos empregando a corrente pulsada para que se pudesse não só avaliar a aplicabilidade da mesma, mas também contribuir para que se tenha disponível maiores informações operacionais a respeito desta.

No caso da corrente pulsada foi encontrada uma certa dificuldade para obtenção do keyhole, especialmente pelo maior número de parâmetros/variáveis a serem determinados. Mesmo assim conseguiu-se estabelecer um bom procedimento de soldagem, cujos dados estão apresentados no item 5.4.2 (j).

Durante os experimentos notou-se que a corrente pulsada proporciona uma melhor estabilidade de keyhole. Isto se verifica quando se tem o adequado conjunto de parâmetros/variáveis de soldagem. A penetração total da solda é garantida na fase de pulso, onde a amplitude da corrente e seu respectivo tempo fornecem as condições ideais para que o jato de plasma penetre pela poça de fusão. Na fase de base, o material anteriormente fundido inicia o processo de solidificação não chegando a se solidificar por completo, o que ocasionaria o fechamento do keyhole. Por isto é importante o correto relacionamento entre os tempos de pulso e de base e as respectivas amplitudes das correntes.

Nas figuras 45 a 48 podem ser observados os CP's soldados. Na superfície da solda verifica-se a presença de pequenas mordeduras. Estas mordeduras foram analisadas e a profundidade destas não excedeu o valor de 1 mm. Este nível de aceitação foi adotado conforme a norma BS [51]. Quando utilizou-se uma vazão maior que 2,0 l/min elas se tornaram mais acentuadas, embora não tenham ultrapassado o nível de aceitação estabelecido pela norma. Para uma vazão menor e mantidos os demais parâmetros, não era obtida a penetração total. Interessante observar que a vazão de gás de plasma utilizada em corrente pulsada para a obtenção de uma solda de qualidade foi um pouco superior àquela adotada para soldagem com corrente constante (1,4 contra 2,0 l/min).

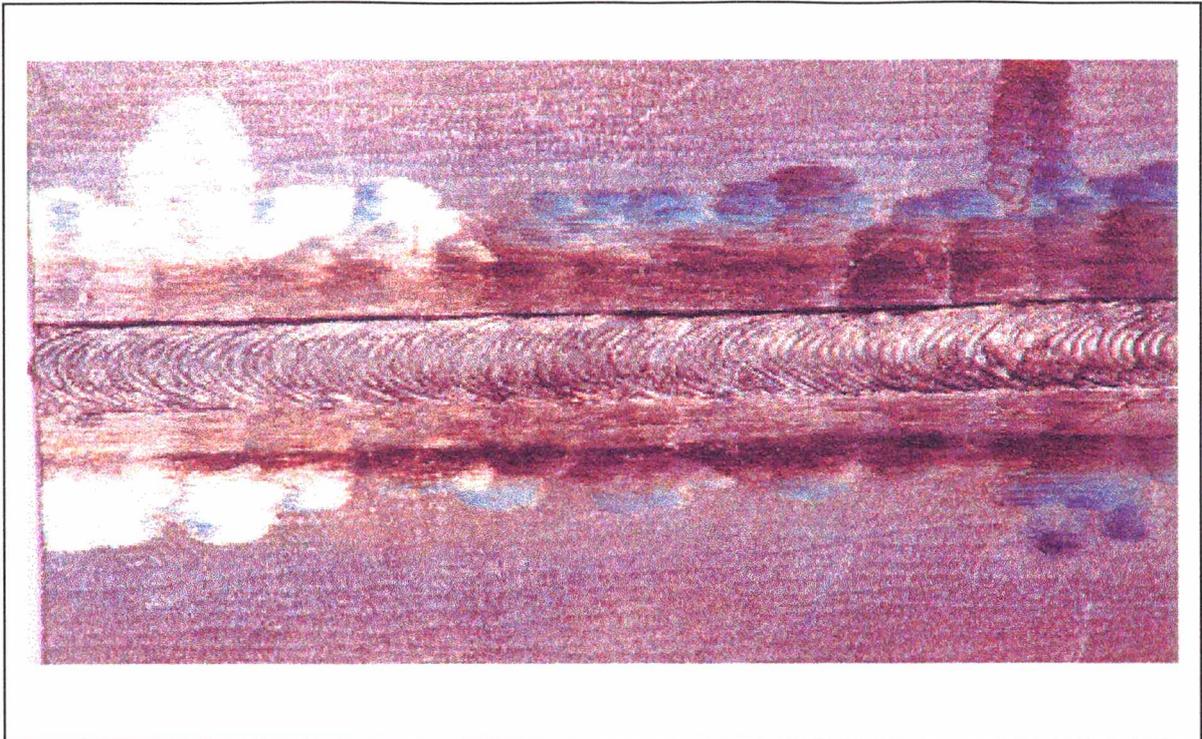
O relacionamento entre os tempos de base e de pulso foi outro fator determinante na característica das soldas. Melhores resultados foram alcançados quando foram utilizados tempos iguais [15]. Duas variações foram testadas e não apresentaram bons resultados. A primeira foi utilizando tempos de pulso maiores que os tempos de base. Foi verificado um excessivo reforço na

raiz, que caracteriza o excesso de penetração da solda. Além disso, ocorreu um ligeiro aumento das mordeduras. Para tempos de base maiores que os de pulso ocorreu falta de penetração na raiz. O material fundido tinha mais tempo para se solidificar e fechar o keyhole que se formava. Ocorria então, a falta completa de penetração ou falhas na raiz das soldas efetuadas nestas condições.

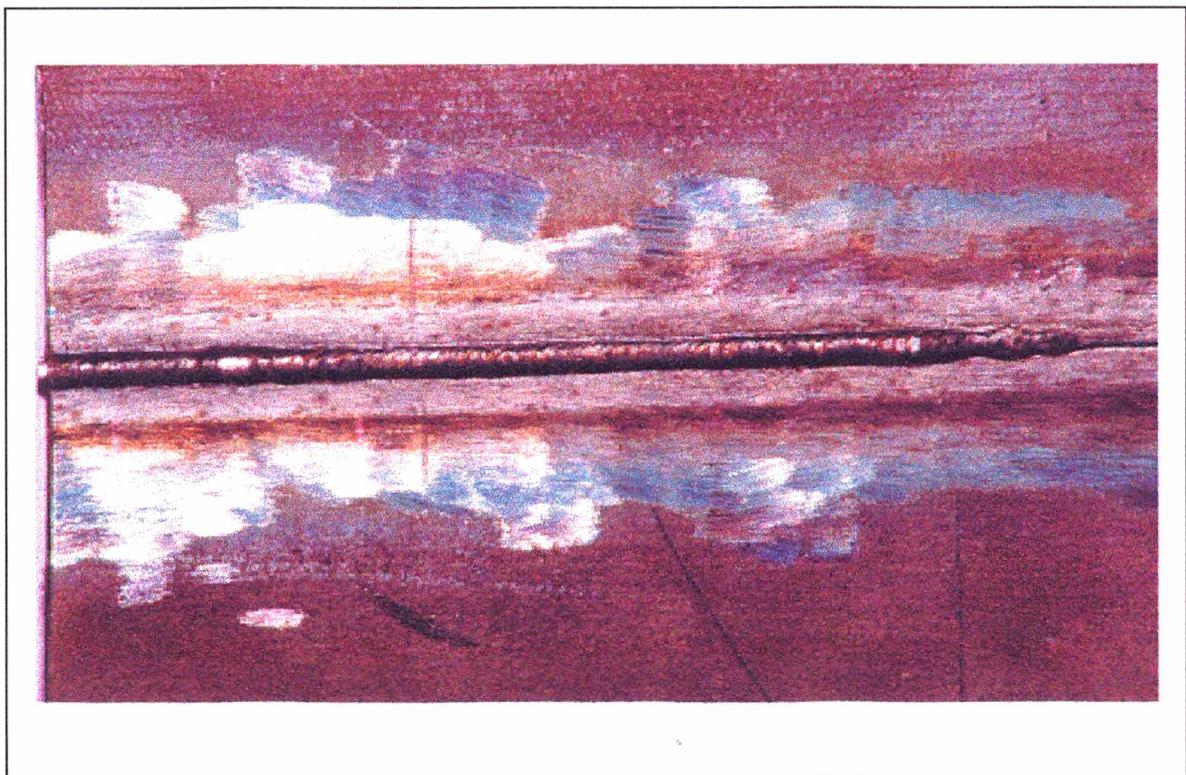
Se comparadas com as soldas realizadas em corrente constante, pode-se perceber que as soldagens efetuadas em corrente pulsada alcançaram uma menor velocidade de soldagem para um material de base de mesmo tipo e espessura. Talvez seja este fator em conjunto com a dificuldade de se estabelecer um adequado procedimento de soldagem que dificulta e restringe a utilização de soldagem plasma pela técnica keyhole por corrente pulsada.

Após o término das soldagens determinou-se a largura média das soldas através da medida de 10 valores da largura ao longo de todo seu comprimento (para cada CP, no total de três). Destas dez medidas foi tirada uma média. Do mesmo modo foi obtido o reforço médio de cada solda. Estes valores foram comparados com os obtidos quando se soldou com o mesmo material e espessura, porém utilizando-se a corrente constante. Para os CP's de 6,35 mm de espessura soldados em corrente pulsada a largura foi de 8,72 mm e o reforço de 0,75 mm. Em corrente constante os CP's apresentaram uma largura de 9,0 mm e reforço de 0,78 mm. Para os CP's de espessura igual a 4,8 mm soldados em corrente pulsada, a largura foi de 7,22 mm e o reforço foi de 0,68 mm. Em corrente constante estes valores foram respectivamente de 7,85 e 0,77 mm em CP's do mesmo material e espessura. Observa-se que a tendência apresentada foi que em corrente pulsada as soldas apresentassem uma menor largura e um menor reforço.

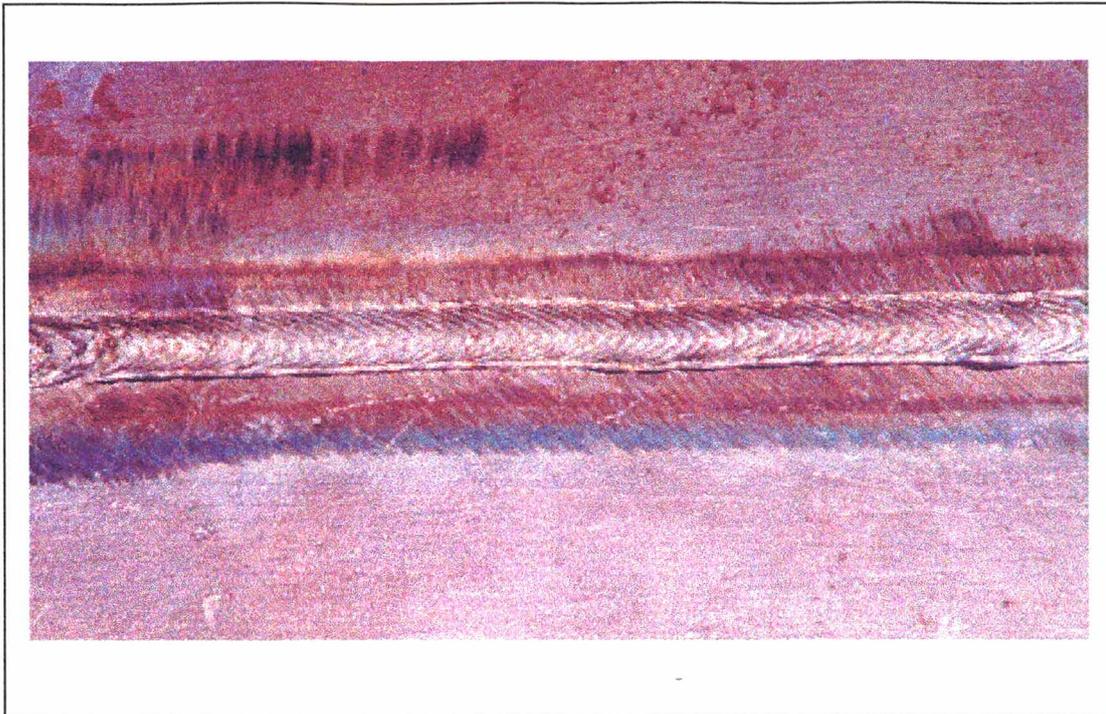
Foi verificado que a ponta do eletrodo apresentou uma maior tendência ao desgaste durante as operações em corrente pulsada, comparando-se por exemplo, com o desgaste provocado pela utilização do eletrodo em corrente constante. Em corrente pulsada, a obtenção do keyhole e sua manutenção e estabilidade se mostraram ser mais satisfatórias que nas operações com corrente constante.



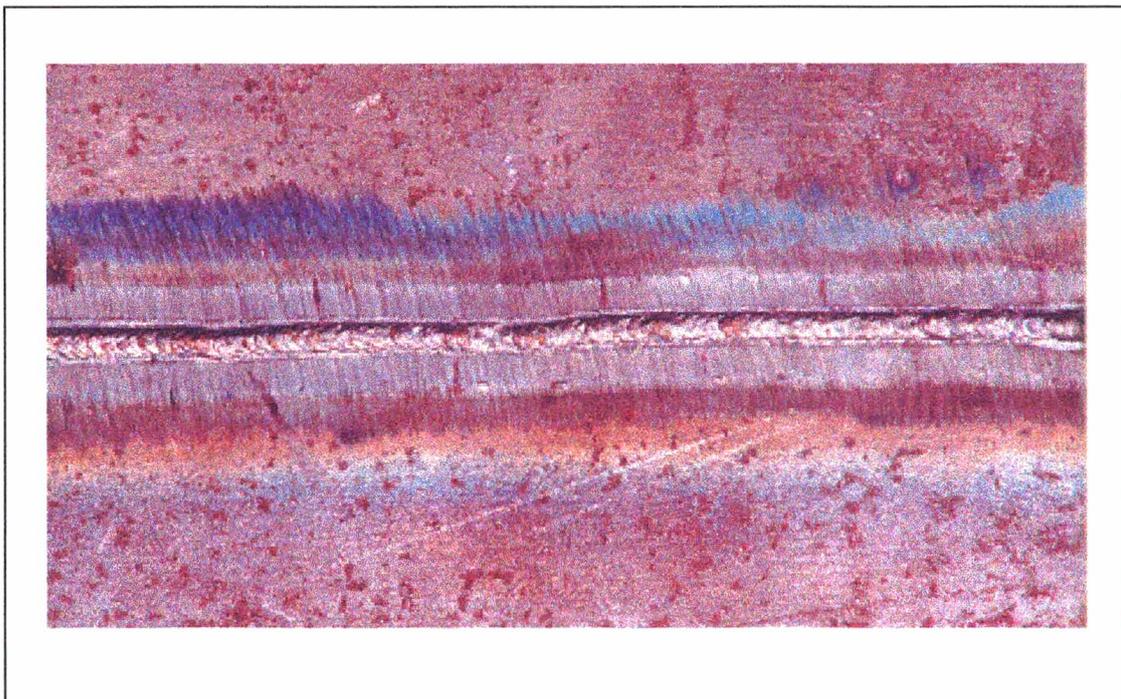
**Figura 45 - Aspecto superficial do corpo de prova soldado. Aço ABNT 1020 de 6,35 mm. Corrente pulsada.**



**Figura 46 - Aspecto da raiz da solda. Aço ABNT 1020 de 6,35 mm. Corrente pulsada.**



**Figura 47 - Aspecto superficial do corpo de prova soldado. Aço ABNT 1020 de 4,8 mm. Corrente pulsada.**



**Figura 48 - Aspecto da raiz da solda. Aço ABNT 1020 de 4,8 mm. Corrente pulsada.**

### 6.11 - Soldagem na Posição Vertical

Na literatura pesquisada não foi encontrada nenhuma informação sobre a aplicação da técnica keyhole para soldagens na posição vertical e tendo-se como material de base o aço carbono. Embora os experimentos na posição vertical tenham sido realizados em número inferior aos experimentos na posição plana, acredita-se que esta seja uma contribuição relevante para o avanço das pesquisas sobre a soldagem plasma.

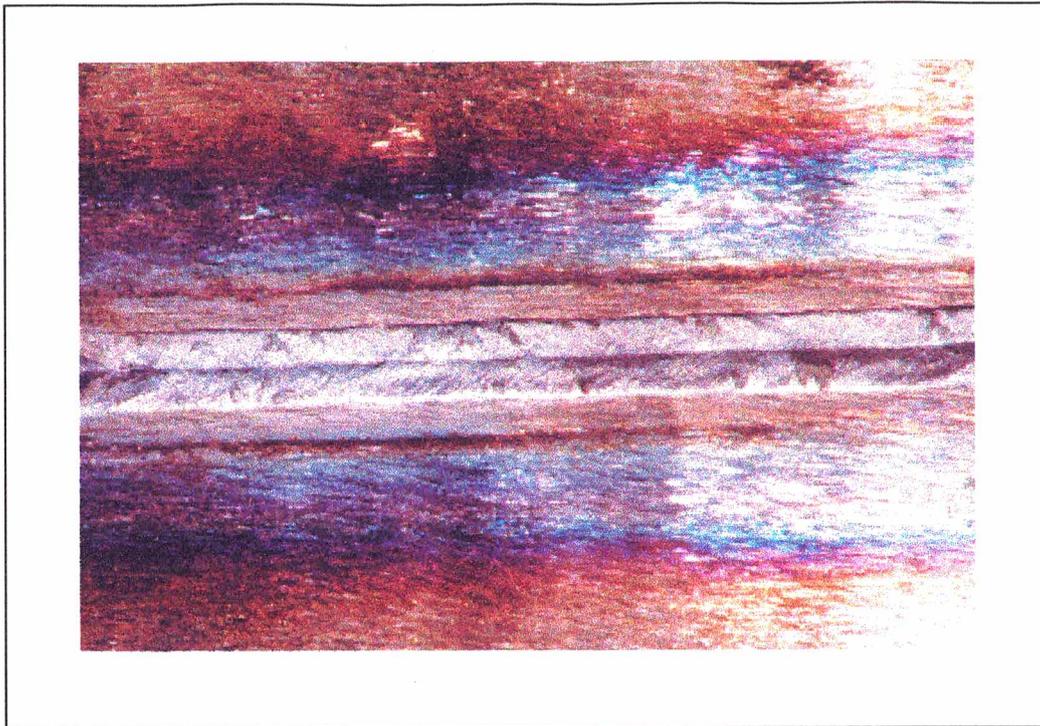
Os experimentos na posição vertical foram realizados seguindo o procedimento estabelecido e que se encontra descrito no item 5.4.2 (l). Soldou-se nas posições vertical ascendente e descendente empregando a corrente contínua constante e a corrente pulsada. Os resultados são apresentados nas figuras 49 a 56, que ilustram a superfície e a raiz dos CP's soldados com o melhor conjunto de parâmetros/variáveis obtidos. As figuras 49 a 52 retratam os CP's de 3,2 mm de espessura, detalhando a superfície e a raiz da solda. Para os CP's de 3,2 mm os melhores resultados foram obtidos soldando-se na posição vertical descendente, tanto com corrente constante como em corrente pulsada. O perfil das soldas foi revelado em um projetor de perfis e mediu-se a largura em vários pontos ao longo de sua extensão. Percebe-se que em corrente pulsada a solda apresentou uma menor largura em relação a produzida com a utilização da corrente constante. Os valores médios obtidos foram comparados e chegou-se a extrair a diferença, expressa também em termos médios, que foi da ordem de 1,4 mm a mais em favor dos CP's soldados em corrente constante. Com relação ao reforço na raiz praticamente não houve diferença significativa entre os valores médios levantados: 0,55 mm para reforço na raiz das soldas efetuadas em corrente pulsada e 0,50 mm de reforço nas soldas em corrente constante.

Tentou-se soldar os CP's de 3,2 mm na posição vertical ascendente. Contudo, tanto em corrente pulsada, quanto em corrente constante, ocorreu um excessivo escorrimento do material fundido na região da junta. Formava-se o keyhole mas, ao invés da poça de fusão se solidificar, ela escorria em sentido oposto ao deslocamento ascendente da tocha. A força da gravidade atua desproporcionalmente à força da tensão superficial, favorecendo o escorrimento da poça de fusão formada. Com isto, ficavam crateras ao longo da solda, deixando grandes falhas ao longo de sua extensão. Talvez este efeito tenha sido favorecido ainda mais em virtude da menor espessura do material de base.

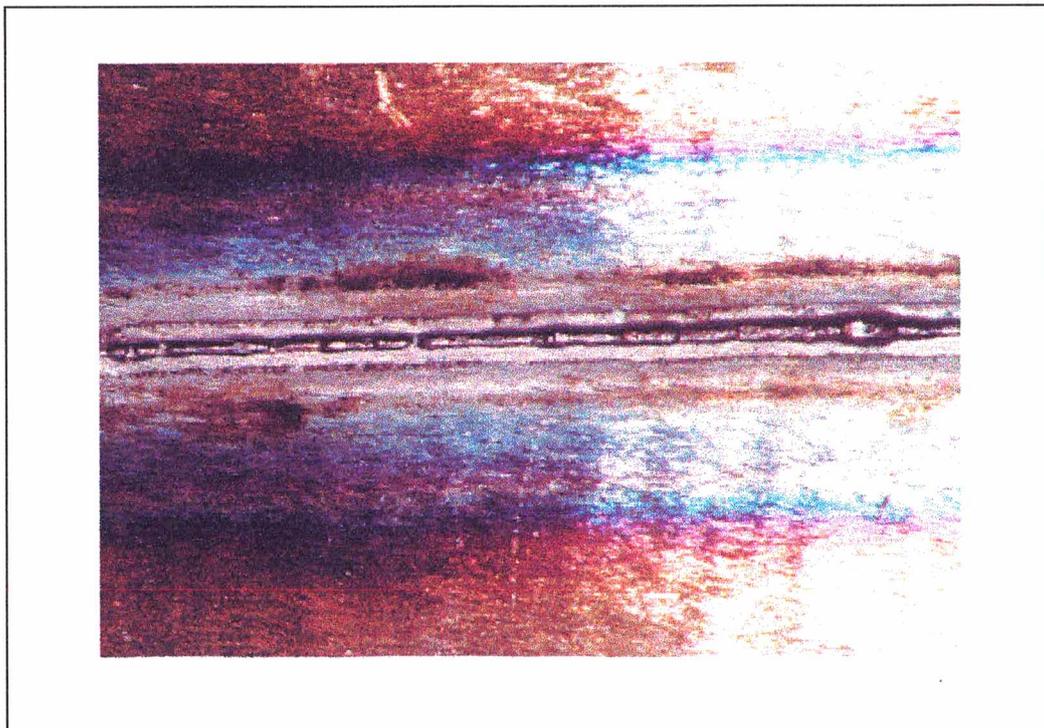
Com relação aos CP's de 6,35 mm, foram levantados procedimentos para a soldagem na posição vertical descendente e ascendente com a utilização da corrente pulsada. Nas figuras 53 a 56 estão apresentados os CP's soldados. Verifica-se que, embora tenha sido obtido um adequado conjunto de parâmetros e variáveis para a soldagem na posição vertical ascendente, a solda não apresentou bons resultados. Na superfície podem ser percebidas acentuadas mordeduras. Estas mordeduras foram analisadas e por norma as soldas efetuadas nestas condições seriam reprovadas. Nota-se que a raiz não apresentou um adequado reforço, ficando praticamente no mesmo plano do material de base. Isto pode ser explicado porque, a exemplo do que ocorreu quando se tentou soldar os CP's de 3,2 mm na posição vertical ascendente, aqui também ocorreu o mesmo efeito de escorrimento da poça de fusão. A diferença básica foi que o material fundido conseguia se solidificar, mesmo sobre o efeito de sua própria massa e da força da gravidade que tendia a expulsá-lo da poça de fusão. Contudo, o material que formaria o reforço na raiz foi "puxado" para a superfície da solda.

Com relação às soldas efetuadas na posição vertical descendente, observa-se nas figuras 55 a 56, que tanto a superfície, quanto a raiz apresentaram um aspecto muito satisfatório. Uma ligeira convexidade pode ser verificada na superfície da solda, provocada provavelmente pela fuga de material fundido pela raiz durante a solidificação. Importante ressaltar que diante dos melhores parâmetros/variáveis estabelecidos para se soldar em passe único os CP's de 6,35 mm de espessura com a configuração da junta de topo, pode-se notar que a soldagem na posição vertical descendente, além de apresentar melhores resultados, proporcionou a possibilidade de se alcançar uma maior velocidade de soldagem. Em geral, soldando-se na posição vertical foi conseguida uma boa repetibilidade dos resultados.

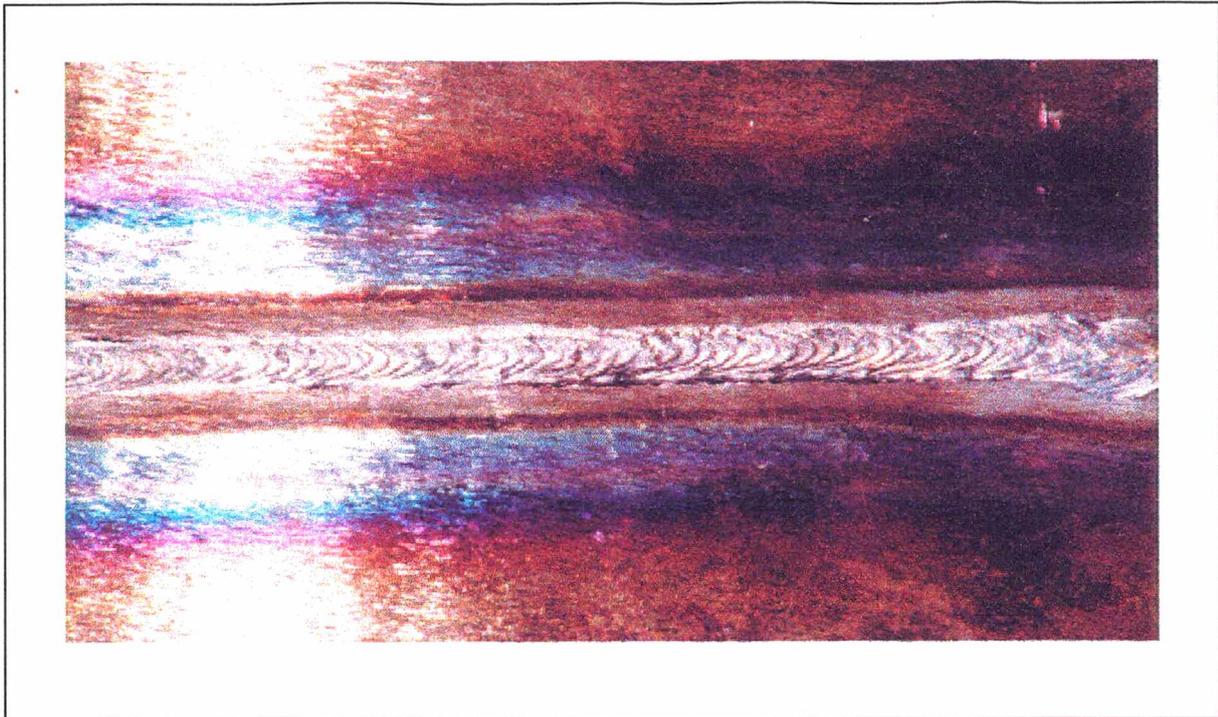
Estes experimentos demonstram que a soldagem plasma pela técnica keyhole pode ser aplicada com êxito fora da posição plana.



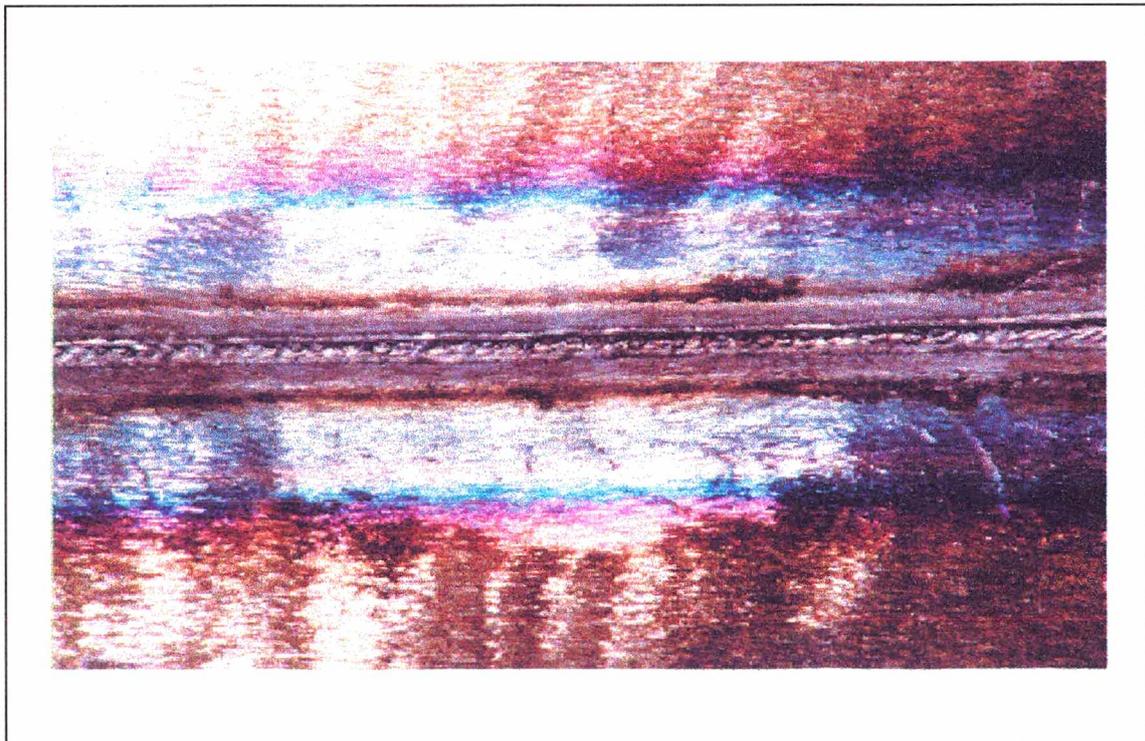
**Figura 49 - Aspecto superficial da solda. Aço ABNT 1020 de 3,2 mm de espessura. Posição vertical descendente. Corrente constante.**



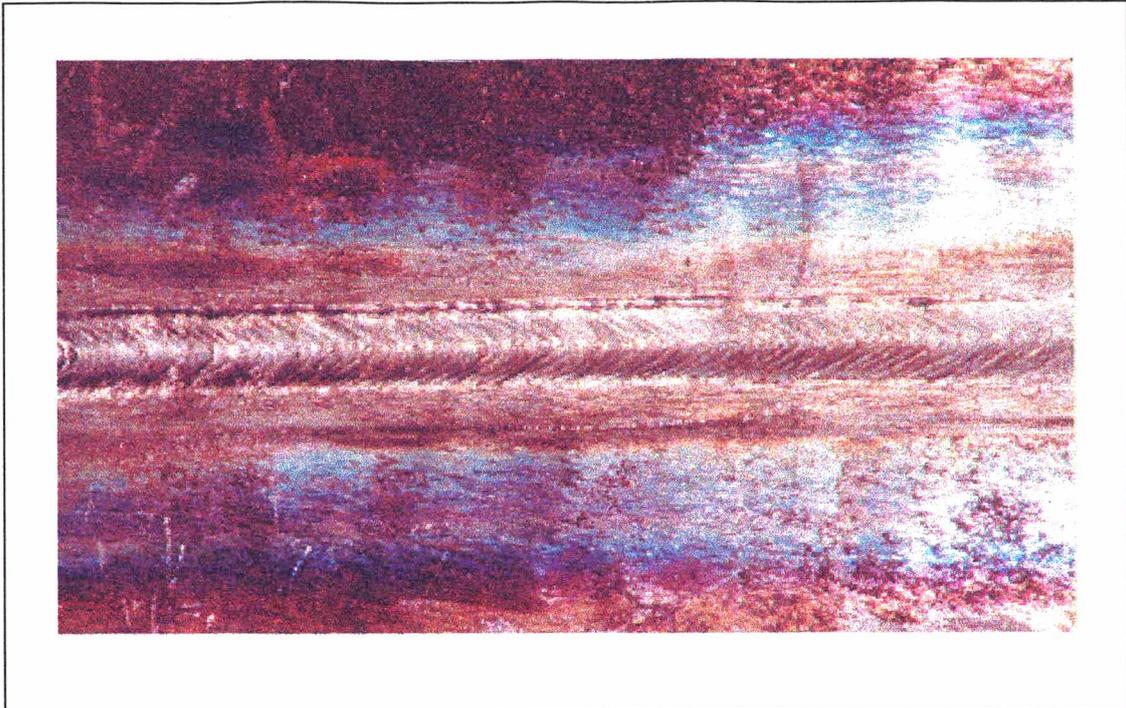
**Figura 50 - Aspecto da raiz da solda. Aço ABNT 1020 de 3,2 mm de espessura. Posição vertical descendente. Corrente constante.**



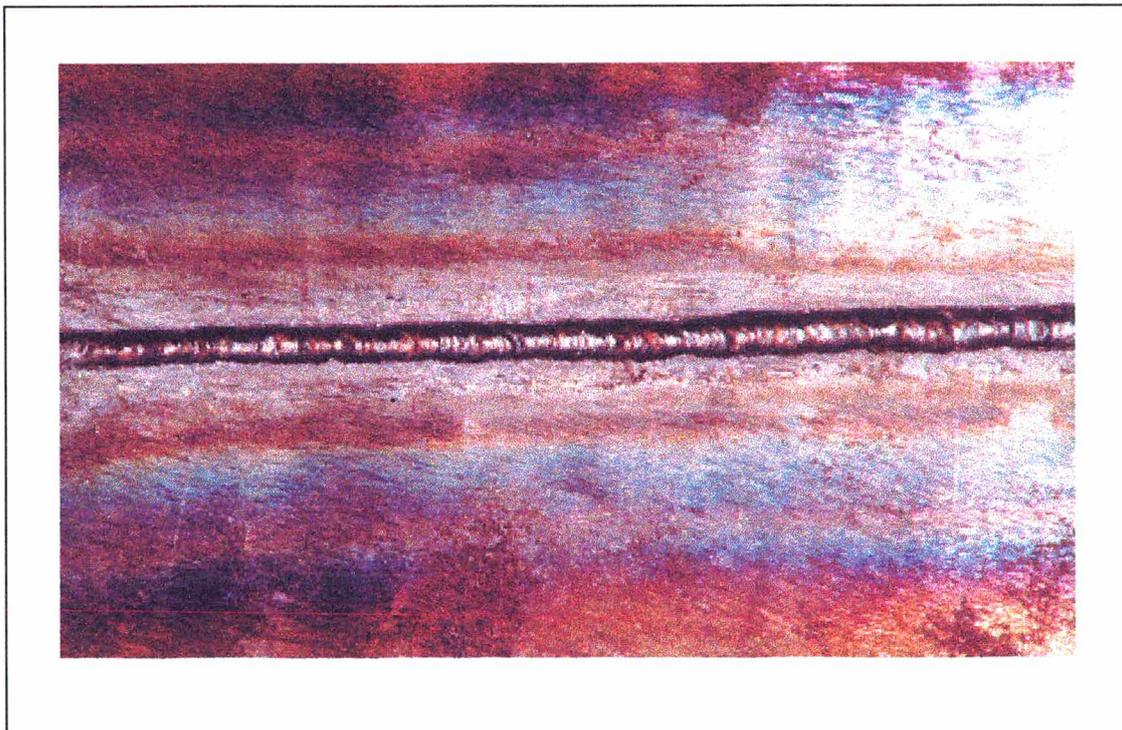
**Figura 51 - Aspecto superficial da solda. Aço ABNT 1020 de 3,2 mm de espessura. Posição vertical descendente. Corrente pulsada.**



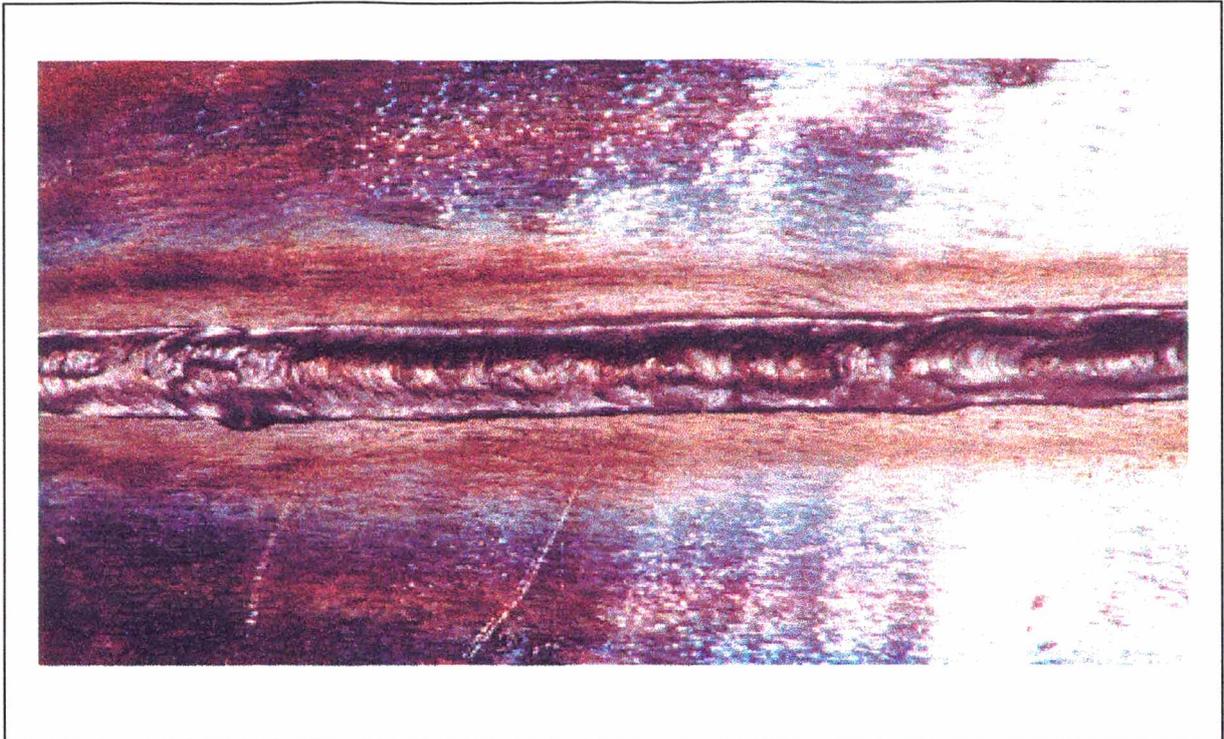
**Figura 52 - Aspecto da raiz da solda. Aço ABNT 1020 de 3,2 mm de espessura. Posição vertical descendente. Corrente pulsada.**



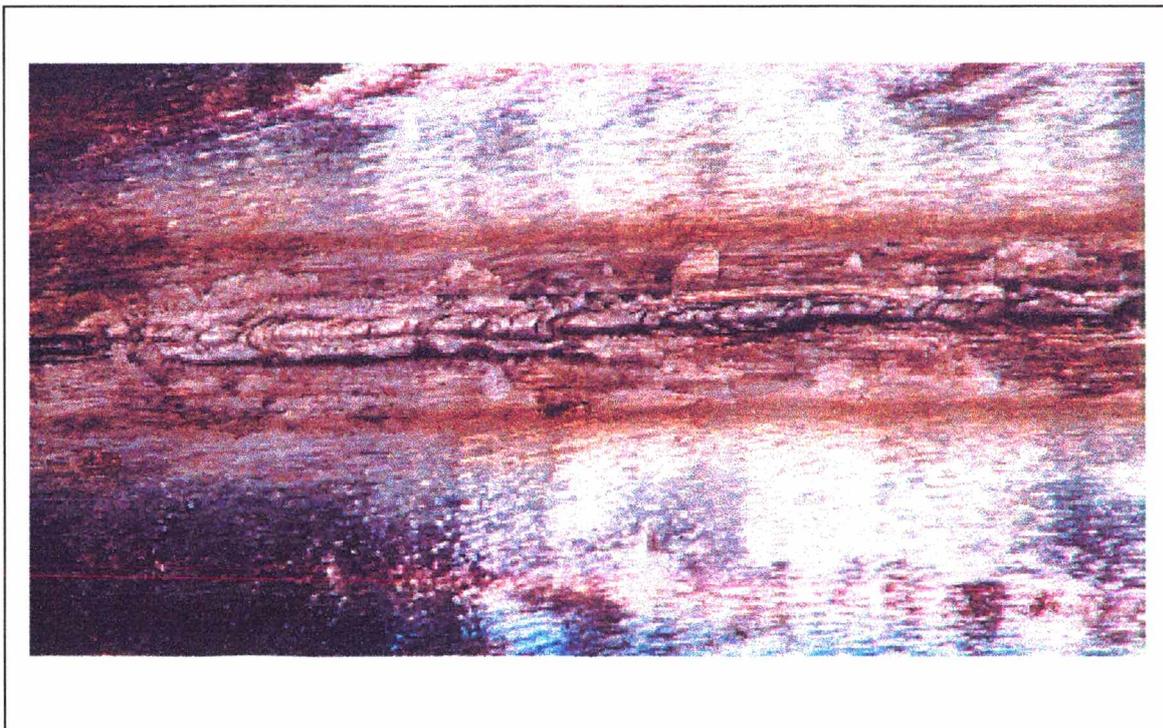
**Figura 53 - Aspecto superficial da solda. Aço ABNT 1020 de 6,35 mm de espessura. Posição vertical descendente. Corrente pulsada.**



**Figura 54 - Aspecto da raiz da solda. Aço ABNT 1020 de 6,35 mm de espessura. Posição vertical descendente. Corrente pulsada.**



**Figura 55 - Aspecto superficial da solda. Aço ABNT 1020 de 6,35 mm de espessura. Posição vertical ascendente. Corrente pulsada.**



**Figura 56 - Aspecto da raiz da solda. Aço ABNT 1020 de 6,35 mm de espessura. Posição vertical ascendente. Corrente pulsada.**

## VII

### CONCLUSÕES

Os objetivos principais deste trabalho que foram contribuir para uma melhor caracterização da soldagem plasma pela técnica keyhole e proceder a montagem da bancada de ensaios, acredita-se que tenham sido alcançados. No caso da bancada, que foi praticamente desenvolvida com tecnologia nacional, pôde-se notar que todos os equipamentos utilizados apresentaram-se com um rendimento muito satisfatório. Isto demonstra que se deve valorizar os produtos desenvolvidos no país, já que fica demonstrado com este trabalho que os equipamentos nacionais, quando bem projetados, apresentam o mesmo rendimento (ou talvez até superior), aos equipamentos importados.

Com relação ao estudo de alguns tópicos específicos chegou-se as seguintes conclusões:

- Estabelecer um adequado procedimento de soldagem com a determinação dos melhores parâmetros/variáveis indicados para se obter o keyhole é uma tarefa que requer bastante meticulosidade, pois pequenas alterações nos parâmetros/variáveis afetam significativamente a qualidade da solda.
- É importante que se tenha uma atenção especial com relação a utilização dos bocais constritores. O desgaste do orifício constritor devido principalmente a uma condição de soldagem inadequada afeta a solda e prejudica a obtenção do keyhole. Também diferentes diâmetros de orifício resultam em distintos procedimentos de soldagem para um mesmo tipo e espessura de material.
- Excessiva vazão do gás de proteção provoca perturbações na solda, formando uma depressão superficial em toda sua extensão.
- O gás de plasma afeta efetivamente a penetração. Pequenas variações na vazão levam a ocorrência de defeitos, tais como: falta de penetração, mordeduras e excessivo reforço na raiz, que

podem reprovar uma solda quando esta é submetida aos critérios de aceitação estabelecidos por norma.

- O controle do aclave/declive da vazão do gás de plasma, através do programa CTA1 apresentou bons resultados no fechamento do keyhole.
- A proteção na raiz da solda proporciona uma melhor estabilidade do keyhole e seu efeito é mais efetivo na soldagem do aço inoxidável.
- É complexo determinar uma área de trabalho para obter soldas de qualidade, pois um grande número de parâmetros/variáveis precisam ser devidamente controlados e pequenas variações de algumas destas grandezas alteram de forma significativa as propriedades da solda. A tendência apresentada foi esta dificuldade se acentuar ao se trabalhar com material de maior espessura.
- Em juntas de maior espessura com configuração em V a técnica keyhole se mostrou uma alternativa muito boa, para o passe de raiz.
- Os resultados dos ensaios mecânico e radiográfico mostraram que as soldas efetuadas na posição plana apresentam uma boa ductilidade e são isentas de defeitos e irregularidades na forma.
- A aplicação da corrente pulsada melhora a estabilidade da poça de fusão, mas tende a produzir mais mordeduras na solda e alcançar uma menor velocidade de soldagem em comparação com aplicações em corrente constante.
- Um bom procedimento de soldagem foi estabelecido para operações na posição vertical, demonstrando que a técnica keyhole pode ser aplicada para soldagem nesta posição.

## VIII

### PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho permitiu o esclarecimento de alguns pontos relacionados a um processo relativamente novo na área de tecnologia da soldagem. Notou-se que embora a soldagem plasma tenha sido comercialmente apresentada há mais ou menos 40 anos, em termos de Brasil pouco se desenvolve de pesquisas nesta área. Desta forma, ainda há muitos outros pontos a serem explorados, de modo a tornar viável a implementação do processo em escala industrial, não o restringindo apenas a pesquisas em laboratório. No sentido de se atingir este objetivo, propõe-se alguns tópicos onde a pesquisa deve ser intensificada.

a) Estabelecer procedimentos de soldagem para uma gama maior de materiais, como por exemplo, outras composições do aço ABNT, aço inoxidável e do alumínio e suas ligas, procurando levantar uma área de trabalho mais abrangente, com um maior número de experimentos. Propõe-se limitar o trabalho a um tipo de material com configuração de junta de topo em I com folga zero em espessura de 6,35 mm operando em CC-.

b) Realizar soldas analisando o efeito proporcionado pela utilização de diferentes gases de plasma e proteção. Para este estudo poderia ser adotado, por exemplo, o hélio e/ou argônio extra-puro como gás de plasma e misturas Ar-He, Ar-H<sub>2</sub> em diferentes composições como gás de proteção.

c) Verificar o comportamento do arco plasma em termos de influência sobre as características da solda mediante a utilização de bocais constritores de múltiplos orifícios. É citado que esta configuração do bocal proporciona ganhos em termos de produtividade e qualidade da solda [1], mas não se encontrou na literatura pesquisada um estudo que mostrasse resultados concretos à cerca desta afirmativa.

- d) Desenvolver um sistema alimentador de arame para ser adaptado à bancada de testes, para que se execute soldas pela técnica keyhole com deposição de material. Este estudo seria particularmente importante para avaliar a produtividade alcançada no preenchimento de juntas de maior espessura que necessitam ser chanfradas e que requerem, ao se utilizar outros processos de soldagem, um número elevado de passes de enchimento.
- e) Implementar o programa CTA1 para que um número maior de testes seja efetuado com o intuito de dar continuidade a análise da influência do controle da vazão do gás de plasma sobre a abertura e principalmente o fechamento do keyhole. Propõe-se criar um “delay” na rampa de gás de plasma, fazendo com que se tenha uma diferença entre o início do declive da corrente e o início do declive do gás de plasma.
- f) Tentar verificar a aplicabilidade da técnica keyhole para soldagem manual.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - SANTOS, J. F. O., QUINTINO, L. Tecnologia de soldadura: realidade atual e perspectivas futuras. In: XVI ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM, p. 2A-25A, Caxambu-MG, dezembro 1990.
- [2] - LUCAS, W. Process pipe and tube welding. England: Abington Publishing, 1991. Cap. 7: TIG and plasma welding developments for fabrication of plant for the chemical, petrochemical and offshore oil and gas industries. P. 89-106.
- [3] - HALMOY, E., FOSTERVOLL, H., RAMSLAND, A. R. New applications of plasma keyhole welding. Welding in the World, v. 34, p. 285-291, 1994.
- [4] - TOMSIC, M., BARHORST, S. Keyhole plasma arc welding of aluminium with variable polarity power. Welding Journal, v. 63, n. 2, p. 25-32, february 1984.
- [5] - CRAIG, E. The plasma arc process - a review. Welding Journal, v. 68, n. 2, p. 19-25, february 1988.
- [6] - QUINTINO, L., CARDOSO, J. Fatigue performance of tungsten inert gas (TIG) and plasma welds in thin sections. Report Internal, Lisboa, p. 1-18, june 1996.
- [7] - Welding Handbook. AWS, v.2 - Welding process, eighth edition, 1991.
- [8] - Plasma-arc cutting and welding. Welding & Fabrication. 1992. p. 23-55.
- [9] - DOWDEN, J., KAPADIA, P. plasma arc welding: a mathematical model of the arc. Physic Journal, v. 27, p. 902-910, january 1994.
- [10] - BASHENKO, V.V., SOSNIN, N. A. Optimization of the plasma arc welding process. Welding Journal, v. 68, n. 10, p. 233s-237s, october 1988.
- [11] - MARANTZ, D.R., KOWALS, K.A. Wire arc plasma: a new contender in metal spraying. Welding journal, v. 70, n. 8, p. 46-50. August 1991.
- [12] - MACHADO, I. G. Soldagem e técnicas conexas: processos. 475 p., porto Alegre, 1996.
- [13] - MARTIKAINEN, J. K., MOISIO, T. J. I. Investigation of the effect of welding parameters on weld quality of plasma arc keyhole welding of structural steels. Welding Journal, v. 72, n. 7, p. 239s-339s, july 1993.

- [14] - UNITED STATES PATENT, Dennis D. Harwig et al. Method for defect free keyhole plasma arc welding. US005225654 n. 5,225,624. July 6, 1993.
- [15] - LUCAS, W. TIG and plasma welding. England: Abington Publishing, 1990. 112 p.
- [16] - ESSERS, W. G. New process combines: plasma with GMA welding. Welding Journal, v. 55, n. 5, p. 394-400, may 1976.
- [17] - WEBER, K. Advances in Welding Techniques using plasma and TIG for stainless steel. FWP Journal, p. 33-39, january 1991.
- [18] - WAHL, W., KRAUSKOPT, F. Plasma-arc powder surfacing of ferrous materials. Welding and Cutting, p. 15-16, february 1993.
- [19] - LUCAS, W. Advances in TIG and plasma process for welding and surfacing. Welding & metal Fabricator, p. 536-540, december 1990.
- [20] - NAMBA, Y., HASHIMOTO, Y. Thermal spraying and plasma transferred arc weld surfacing powders. Kobelco Thecnology Review, n. 9, p. 2-5, october 1990.
- [21] - TAKAHASHI, W. NAKANISHI, M. KUWAYAMA, T. Development of plasma transferred arc hard facing on titanium alloys using a new wear-resistant titanium alloy. The sumitomo search, n. 39, p. 11-16, september 1989.
- [22] - HUGHES, R. V., DRYBURGH G., GARBETT, S. Plasma braze welding in autobody production at jaguar cars. Welding & Metal Fabrication, p. 110-111, march 1995.
- [23] - SMALLBONE, C. Past, present and future developments in welding processes. Materials Engineering, 1 st International Symposius Johanesburgo, South África, v. 87, n. 9, p. 111-137, november 1987.
- [24] - WOODARD, L. D. Microplasma arc welds switches. Welding Design & Fabricator, p. 67-69, march 1989.
- [25] - LHO, T. J., UM, D. G., NA, S. J. A study on arc characteristics and its application to height control in plasma arc cutting. Welding Journal, v. 71, n. 8, p. 227s-282s, august 1992.
- [26] - LARSON, N. E., MEREDITH, W. H. Welding with plasma arc technology. The Fabricator, v. 24, n. 9, p. 14-15, november 1994.
- [27] - GONÇALVES, V., QUINTINO, L. Development of an automatzed system for plasma arc welding. Report Internal - Instituto de soldadura e Qualidade, p.108-114, july 1988.

- [28] - SULC, S. Make the smitch to automatic PAW. Welding Journal, v. 69, n. 9, p. 59-60, september 1990.
- [29] - Thermal Dynamics Corporation, West Lebanon. N. 0-2031: Instruction manual. Estados Unidos, 1994. 24p.
- [30] - PANG, Q., PANG, T., McCLURE, J. C., NUNES, A. C. Workpiece cleaning during variable polarity plasma arc welding of aluminium. Journal of Engineering for Industry, v. 116, p. 463-466, november 1994.
- [31] - JR, A. C. N., JR, BAYLESS, E. O., JONES, C. S., MUNAFO, P.M., BIDDLE, A. P., WILSON, W. A. Variable polarity plasma arc welding on the space shutlle external tank. Welding Journal, v. 63, n. 9, p. 7-35, september 1984.
- [32] - CARY, H. B. Soldagem MIG sinérgico e soldagem a arco plasma com polaridade variável. In: XV ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM, p. 141-179, São Paulo-SP, novembro 1989.
- [33] - HOWDEN, D. G., Advances in welding technology. Modern Stell Construction, p. 40-41, march 1992.
- [34] - HENNE, RUDOLF. Direct current plasma torches for thermal spayng - present status and new developments. Welding and Cutting, p. 26-30, february 1993.
- [35] - GERKEN, J. M. Gas Tungsten Arc Welding. Cleveland: The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, 1991. 42 p.
- [36] - GARCIA, J. A. ORLOWSKI. Variable Polarity Plasma Arc Welding of aluminium Lithium Alloy. Inglaterra: Cranfield University, 1994. Dissertação de mestrado - School of Industrial and Manufaturing Science, Cranfield university, 1994. 88p.
- [37] - USHIO, MASAO. Plasma application in steel industry in Japan. Welding Research Abroad, v. 21, n. 1, p. 13-19, january 1992.
- [38] - BENNETT, B. Gases for TIG and plasma arc welding. Welding & Metal Fabrication, p. 335-336, july 1990.
- [39] - MARTINEZ, L. F., MATLOCK, C., MARQUES, R. E., McCLURE, J. C., JR, A. C. N. Effect of weld gases on melt zone size in VPPA welding of Al 2219. Welding Journal, v. 73, n. 8, p. 51-55, october 1994.

- [40] - TORRES, M. R., McCLURE, J. C., NUNES, A. C., GUREVITCH, A. C. Gas contamination effects in variable polarity plasma arc welded aluminium. Welding Journal, v. 71, n. 4, p. 123s-131s, april 1992.
- [41] - MARTINEZ, L. F., MARQUES, R. E., McCLURE, J. C., JR, N. A. C. Front side keyhole detection in aluminium alloys. Welding Journal, v. 71, n. 5, p. 49-51, may 1992.
- [42] - ERY SHEV, O. N., MAKAROV, A. G., SHARAPOV, M. G. Efficiency of gas shielding in plasma-arc welding aluminium alloys using reverse polarity DC. Paton Welding Journal, v. 3, n. 10, p. 796-797, 1991.
- [43] - KOU, S. Welding Metallurgy. EUA: Wiley - Interscience Publication, 1987. Cap 1: Fusion welding process. P. 3-21.
- [44] - BOUCHER, C., MESSEGER, F. All-position arc welding de titanium. In: XXII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM, p. 595-606, Blumenau-SC, julho 1996.
- [45] - TAGUCHI, H. HANEDA, M. IMANAGA, S. Dropping transfer of filler wire for vertical plasma welding. International Conference on Arc Physics and weld pool Behavior, The Welding Institute, Cambridge, p. 193-202, 1980.
- [46] - KEANINI, R. G., RUBINSKY, B. Plasma arc welding under normal and zero gravity. Welding Journal, v. 69, n. 6, p. 41-49, june 1990.
- [47] - JUNYUE, L., HUAN, L., YONG, H. CUNHAI, P. Study on the characteristics of underwater plasma arc. IW Document, Doc. 212-860-94, 7p., 1994.
- [48] - FUKUSHIMA, S., FUKUSHIMA, T., KINUGAWA, J. Preliminary experiment on improvement of underwater wet plasma welds using filler metals. Transactions of National Research Institute for Metals, v. 24, n. 4, p. 207-217, 1982.
- [49] - OMAR, A. A., LUNDIN, C. D. Pulsed plasma - pulsed GTA arc: a study of the process variables. Welding Journal, v. 58, n. 4, p. 97s-105s, april 1979.
- [50] - VILKAS, E. P. Plasma arc welding of exhaust pipe system components. Welding Journal, v. 70, n. 4, p. 49-52, april 1991.
- [51] - Critérios de aceitação segundo a British Standard. BS 5500/1994 e BS 2633/1987 - seção 8.
- [52] - Manual de soldagem da Fonte INVERSAL 300. Laboratório de soldagem e Mecatrônica da UFSC. 1ª edição. Setembro 1995.

- [53] - JÚNIOR, R. G. Projeto e realização de uma fonte de energia para soldagem multi-processo. Dissertação de mestrado, UFSC, 1992.
- [54] - ROTONDALO, R., STRUL, H. Confiabilidade Metrológica. Fundação Vanzolini. São Paulo, 1995. 180p.
- [55] - Qualificação de Soldagem. Código ASME, seção IX, norma QW-462, Ed. 1980, Traduzido pelo IBP.
- [56] - WORTH, W. E. Statistical Techniques in Technological Research. England; 1968. 303p.
- [57] - Deutschs Institut Für Normung. DIN EN 25817, 1992.
- [58] - OLIVEIRA, C. A.; CAVALCANTI, C. G. Desenvolvimento do aço DIN 17.102 WStE 355; XXXII seminário de laminação (COLAM-ABM). Curitiba, 1995.