

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

11011
521.491
R527a
TGS/mem

**APLICAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR PLASMA PELA
TÉCNICA "KEYHOLE" NO PASSE DE RAIZ DE UMA JUNTA
CHANFRADA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia por:

ANDRÉ RICHETTI

como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia
Mecânica

Orientador: Prof. Valtair Antonio Ferraresi, Dr.

DIRBI/UFU



1000186963

Banca Examinadora:

Prof. Valtair Antonio Ferraresi, Dr. (UFU)

Prof. Américo Scotti, Dr. (UFU)

Prof^a. Roseana da Exaltação Trevisan, Dra. (UNICAMP)

Uberlândia, Julho de 1998.

RESUMO

O processo de soldagem por plasma é um processo de fabricação considerado de alta produtividade, mas ainda pouco utilizado em escala industrial. Os principais obstáculos à implantação deste processo são a falta de informações técnicas e as dificuldades operacionais inerentes à soldagem. Estes problemas são mais críticos em aplicações com juntas chanfradas, onde se verifica uma quantidade muito pequena de trabalhos técnicos, quase sempre sem um adequado aprofundamento do assunto. Este trabalho teve como objetivos: realizar uma investigação para a elaboração do envelope operacional do passe de raiz em uma junta em V de aço carbono, utilizando a técnica "keyhole"; verificar a repetibilidade do cordão de solda para as condições deste envelope; e estudar o efeito de variáveis e aspectos da operação de soldagem na repetibilidade do processo. O levantamento do envelope operacional foi feito em termos de corrente, velocidade de soldagem e vazão de gás de plasma e, apesar da sua determinação, não foi conseguida a repetibilidade do cordão de solda. Foi verificada uma instabilidade na manutenção do "keyhole". Em função disso, foram estudados vários fatores, tais como: a confiabilidade dos equipamentos de soldagem, o processo de limpeza e pequenas variações dimensionais do corpo de prova, recuo do eletrodo e tipo do gás de proteção. Deste estudo, verificou-se que o tipo do gás de proteção foi o fator mais influente. Os melhores resultados em termos de qualidade superficial e de estabilidade na manutenção do "keyhole" foram obtidos quando se utilizou o argônio puro como gás de plasma e misturas de argônio com 10% de CO_2 ou com 5% de O_2 como gás de proteção.

ABSTRACT

Plasma arc welding is a fabrication process considered of high productivity, but still used in a small scale in the industry. The main obstacles for the process implantation are lack of technical information and welding operational difficulties. These problems become more critical in root welding of single-V-groove joints, in which little work was spent on, ordinarily in a superficial way. The aims of this work were: the elaboration of a parameter operational box for the root pass in a single-V-groove joint of carbon steel, using the keyhole mode; the verification of weld bead repeatability into tolerance box borders; and the study of the effect of some welding operation variables on the repeatability of the process. The development of the operational box was made in terms of current, welding speed and plasma gas flow. The repeatability of the weld bead was not reached for the operational box welding conditions. An instability phenomenon was verified in the keyhole maintenance. Due to this fact, some factors were studied, such as: the welding equipment reliability, the metal cleaning technique, test plate dimensional variations, electrode setback and shielding gas compositions. From this study, it was verified that shielding gas composition was the most influential factor. The best results related to superficial quality and keyhole maintenance were obtained by using pure argon as plasma gas and argon with 10% CO₂ or 5% O₂ mixtures as shielding gases.

**À Deus, aos meus pais, Justino e Terezinha
aos meus irmãos, Márcia, Cláudia e Felipe.**

AGRADECIMENTOS

Ao professor e orientador Valtair Antonio Ferraresi, pela orientação e pelo incentivo na realização deste trabalho.

Ao professor Américo Scotti, pelo grande apoio à minha formação acadêmica.

Aos meus grandes amigos, alunos e técnicos do LAPROSOLDA/UFU, Lazinho, Cleber, Quirino, Márcio, Hilton, Iaran, Rangel, Moisés, David, Cesar, Warley, Paulo, Juliano e os cearenses Hélio e Davi, pelo convívio, amizade e pela ajuda em determinadas etapas deste trabalho.

A todos os membros da Oficina Mecânica da UFU, Dico, Zé Pedro, Carlão, "Passarinho" e Reginaldo (LPU), pelo apoio na realização de trabalhos de oficina.

Aos membros do Laboratório de Materiais, Angela, Wisner, José Natal, Ivo e Bozzi, pelo apoio técnico na preparação das amostras.

A todos os meus amigos e familiares, pelo apoio e incentivo durante todo o curso.

Aos amigos do LABSOLDA/UFSC, André, Erwin e Larry, pelas informações e pela ajuda na calibração do dispositivo de medição de vazão de gás.

Ao CNPQ, pelo suporte financeiro concedido.

Aos professores, alunos e ao pessoal da secretaria do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFU, pelos recursos financeiros e pessoal despendidos para a realização deste trabalho.

Às empresas LUNASA, AIR LIQUIDE BRASIL S/A e WHITE MARTINS GASES INDUSTRIAIS S/A pelo fornecimento de materiais e gases para soldagem.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	iv
LISTA DE FIGURAS.....	v
NOMENCLATURA.....	vii
1- INTRODUÇÃO.....	1
2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1- Introdução.....	3
2.2- Processo de soldagem por plasma.....	4
2.2.1- Aspecto geral.....	4
2.2.2- Constrição do arco.....	6
2.2.3- Tipos de arco.....	8
2.2.4- Técnicas de soldagem.....	9
2.2.5- Equipamentos.....	12
2.3- Materiais.....	15
2.3.1- Gás de plasma.....	15
2.3.2- Gás de proteção.....	16
2.3.3- Material de base e tipo de junta.....	20
2.3.4- Material de adição.....	22
2.3.5- Eletrodos.....	23
2.4- Influência dos parâmetros de soldagem.....	23
2.4.1- Corrente.....	23
2.4.2- Velocidade de soldagem.....	25
2.4.3- Tipo e vazão de gás de plasma.....	26
2.4.4- Tipo e vazão de gás de proteção.....	28
2.4.5- Distância tocha-peça (“torch standoff”).....	31

2.4.6- Diâmetro e forma do orifício do bocal constritor.....	32
2.4.7- Ângulo de ponta do eletrodo.....	34
2.4.8- Recuo do eletrodo (“electrode setback”).....	35
2.5- Defeitos de soldagem relacionados ao processo PAW.....	37
3- PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	43
3.1- Introdução.....	43
3.2- Equipamentos de soldagem.....	43
3.2.1- Fonte de soldagem.....	44
3.2.2- Módulo plasma.....	45
3.2.3- Medidores de vazão de gás.....	45
3.2.4- Tocha de soldagem.....	47
3.2.5- Sistema de movimentação da tocha.....	48
3.2.6- Sistema de aquisição e tratamento de dados.....	49
3.2.7- Sistema de aquisição e tratamento de imagens.....	49
3.2.8- Instrumentos de medição geométrica.....	49
3.3- Materiais.....	50
3.3.1- Corpos de prova.....	50
3.3.2- Gases.....	50
3.3.3- Eletrodo.....	51
3.4- Procedimento experimental.....	52
3.4.1- Procedimento de soldagem.....	52
3.4.2- Planejamento do experimento.....	53
3.4.3- Análise geométrica das amostras.....	53
4- TESTES PRELIMINARES.....	55
4.1- Introdução.....	55
4.2- Condição inicial de teste.....	55
4.3- Ajuste da condição inicial de teste.....	56
4.4- Alteração do gás de proteção e da condição de soldagem.....	59

4.5- Alteração do diâmetro do orifício constritor e da face da raiz (nariz) da junta.....	64
4.6- Determinação dos limites máximo e mínimo das variáveis de soldagem para o planejamento do experimento.....	68
5- RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	70
5.1- Introdução.....	70
5.2- Planejamento do experimento.....	70
5.3- Determinação do envelope operacional.....	70
5.4- Validação do envelope operacional.....	79
5.5- Verificação da instabilidade do envelope operacional.....	83
5.5.1- Confiabilidade dos equipamentos de soldagem.....	83
5.5.2- Limpeza do corpo de prova.....	85
5.5.3- Desvios de dimensão na face da raiz (nariz) da junta.....	86
5.5.4- Recuo do eletrodo.....	89
5.5.5- Tipo do gás de proteção.....	91
6- CONCLUSÕES.....	98
7- PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	100
8- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Recomendações da AWS para a seleção do gás de plasma.....	16
Tabela 2.2- Propriedades físicas dos gases aplicados à soldagem por plasma.....	17
Tabela 2.3- Recomendações da AWS para a seleção do gás de proteção.....	19
Tabela 4.1- Resultados dos testes realizados a partir do ajuste da condição inicial.....	57
Tabela 4.2- Condições e resultados dos testes utilizados para a determinação da faixa operacional do “keyhole”.....	61
Tabela 4.3- Condições e resultados dos testes feitos para a verificação da regularidade do cordão de solda.....	66
Tabela 5.1- Planejamento do experimento e resultados dos testes.....	72
Tabela 5.2- Resultados dos testes realizados para o fechamento do envelope operacional.....	78
Tabela 5.3- Resultados dos testes realizados para a validação do envelope operacional.....	80
Tabela 5.4- Resultados dos testes feitos para a verificação da influência do processo de limpeza dos corpos de prova sobre a repetibilidade dos resultados.....	86
Tabela 5.5- Resultados dos testes feitos para a verificação da influência da variação dimensional dos corpos de prova sobre a estabilidade do cordão de solda.....	88
Tabela 5.6- Resultados dos testes feitos para a verificação da influência do reco do eletrodo sobre o comportamento do cordão de solda.....	90
Tabela 5.7- Resultados dos testes feitos para verificar o efeito da variação da composição do gás de proteção e do gás de plasma no comportamento do cordão de solda.....	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Bocal do processo PAW.....	5
Figura 2.2: Efeito da constrição do arco sobre a temperatura e a tensão de soldagem.....	7
Figura 2.3: Tipos de arcos utilizados na soldagem pelo processo PAW.....	8
Figura 2.4: Técnica “keyhole” de soldagem.....	10
Figura 2.5: Conjunto básico de equipamentos utilizados na soldagem por plasma.....	12
Figura 2.6: Circuitos para a abertura dos arcos piloto e principal nos modos transferido e não transferido de arco.....	14
Figura 2.7: Esquema para a execução da proteção da raiz da solda.....	20
Figura 2.8: Juntas recomendadas para a soldagem por plasma.....	21
Figura 2.9: Forma do arco em função do tipo do bocal de constrição.....	33
Figura 2.10: Efeito da forma do orifício constritor sobre o arco plasma.....	34
Figura 2.11: Influência do recuo do eletrodo no grau de constrição do arco.....	36
Figura 2.12: Defeitos comuns encontrados na soldagem pelo processo PAW.....	38
Figura 3.1: Sistema de soldagem.....	44
Figura 3.2: Curva de calibração do rotâmetro utilizado para a medição da vazão do gás de plasma.....	46
Figura 3.3: Dispositivos de regulagem e medição da vazão do gás de plasma.....	46
Figura 3.4: Tocha de soldagem PWM-300.....	47
Figura 3.5: Sistema de movimentação da tocha de soldagem.....	48
Figura 3.6: Configuração do corpo de prova.....	50
Figura 3.7: Alinhamento do corpo de prova em relação à direção de movimento da tocha.....	52
Figura 3.8: Critério utilizado para avaliar os cordões de solda.....	54
Figura 4.1: Defeito “humping” observado em soldas com penetração excessiva.....	58
Figura 4.2: Acabamento superficial da solda obtido com argônio puro como gás de proteção e de plasma.....	59

Figura 4.3: Acabamento superficial obtido com proteção gasosa de argônio puro e de argônio com 25% de CO ₂	64
Figura 4.4: Vista superior do “keyhole” produzido no final do cordão de solda.....	67
Figura 4.5: Vista da raiz da solda.....	67
Figura 4.6: Acabamento superficial do cordão de solda obtido nos testes da Tabela 4.3.....	68
Figura 5.1: Região de obtenção do “keyhole” para uma vazão de gás de plasma de 0,8 l/min.....	75
Figura 5.2: Região de obtenção do “keyhole” para uma vazão de gás de plasma de 1,0 l/min.....	75
Figura 5.3: Região de obtenção do “keyhole” para uma vazão de gás de plasma de 1,2 l/min.....	76
Figura 5.4: Envelope operacional do passe de raiz pela técnica “keyhole”.....	76
Figura 5.5: Envelope operacional completo.....	78
Figura 5.6: Comportamento da corrente durante a soldagem.....	84
Figura 5.7: Comportamento da tensão durante a soldagem.....	85
Figura 5.8: Efeito do recuo do eletrodo sobre o cordão de solda.....	90
Figura 5.9: Acabamento superficial do cordão de solda obtido com uma atmosfera protetora de argônio com 10% de CO ₂	94
Figura 5.10: Acabamento superficial do cordão de solda obtido com uma atmosfera protetora de argônio puro.....	95

NOMENCLATURA

%	Porcentagem.
-	Polo negativo do circuito.
”	Polegada (25,4 mm).
+	Polo positivo do circuito ou sinal de adição.
<	Menor que.
>	Maior que.
°	Grau.
°C	Grau celsius.
°K	Grau kelvin.
A	Ampère.
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
ANSI	American National Standards Institute.
Ar	Gás argônio.
AVC	Arc Voltage Control
AWS	American Welding Society.
CA	Corrente alternada.
cal	Caloria.
cal/cm.s	Unidade de condutividade térmica.
CC	Corrente contínua.
CC-	Corrente contínua em polaridade direta.
CC+	Corrente contínua em polaridade inversa.
cm	Centímetro (10^{-2} m).
CO ₂	Gás dióxido de carbono.
ed.	Edição.
et al.	Et alli (entre outros).
eV	Elétron volt.
EWTh-2	Eletrodo de tungstênio com 2% de óxido de tório.
GMAW	Gas Metal Arc Welding.
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding.

H ₂	Gás hidrogênio.
He	Gás hélio.
Kg	Quilograma (unidade de massa).
Kg/m ³	Unidade de densidade (massa/volume).
KW	Quilo watts (unidade de potência).
l	Litro.
Lr	Largura da raiz da solda.
m ³	Metro cúbico (unidade de volume).
min	Minuto.
mm	Milímetro.
ms	Milisegundo.
N ₂	Gás nitrogênio.
O ₂	Gás oxigênio.
PAW	Plasma Arc Welding.
R	Resistor.
Rr	Reforço da raiz da solda.
s	Segundo.
SMAW	Shielded Metal Arc Welding (eletrodo revestido).
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina.
V	Volt.
W	Tungstênio.
ZAC	Zona Afetada pelo Calor.

1- INTRODUÇÃO

A crescente busca pelo aumento da produtividade por parte das indústrias está suportada na constante melhoria dos equipamentos e processos de fabricação. O processo de soldagem por plasma⁽¹⁾ é um processo que, embora desenvolvido a mais de 40 anos, foi recentemente aperfeiçoado para a sua utilização na área industrial, permitindo a realização de soldas com alta qualidade e produtividade.

É através da técnica “keyhole” que os benefícios do processo de soldagem por plasma se tornam evidentes. Com esta técnica, pode-se soldar, em um único passe, juntas retas de topo com até 10 mm de espessura e obter elevados ganhos de produtividade em relação a processos, tais como: SMAW (“Shielded Metal Arc Welding”), GTAW (“Gas Tungsten Arc Welding”) e GMAW (“Gas Metal Arc Welding”). Entre as principais aplicações do processo de soldagem por plasma, destacam-se as operações que requerem elevadas qualidade e produtividade, como em aplicações de grande responsabilidade e na soldagem automatizada.

As dificuldades operacionais e a falta de informações técnicas sempre foram um empecilho para a implantação do processo PAW. Aplicações deste processo em juntas chanfradas são muito pouco divulgadas, sendo, na maioria dos casos, apresentada apenas uma condição de soldagem específica para o caso analisado. Isto se torna um problema quando, por dificuldades do próprio processo, não se consegue reproduzir condições descritas em trabalhos de pesquisa, situação esta que pode ocorrer até com a utilização de equipamentos de diferentes marcas (Garcia & Norrish, 1995). Portanto, a principal motivação para a elaboração deste trabalho advém da necessidade de maiores informações relacionadas com a soldagem deste processo em junta chanfrada.

Os objetivos deste trabalho são:

- 1- Montar um envelope operacional para o passe de raiz em uma junta chanfrada (preparação em V) através da técnica “keyhole”;
- 2- Verificar a repetibilidade das condições de soldagem do envelope operacional;
- 3- Estudar o efeito de alguns aspectos e variáveis da operação de soldagem (confiabilidade dos equipamentos de soldagem, limpeza das peças, recuo do eletrodo, variações dimensionais na face da raiz da junta e tipo do gás de proteção) com relação à repetibilidade do processo.

Para alcançar os objetivos propostos neste trabalho, o desenvolvimento será realizado em três etapas. Na primeira etapa, serão realizados os testes preliminares, objetivando a

(1) De acordo com a “American Welding Society”, este processo é denominado PAW (“Plasma Arc Welding”).

obtenção da experiência prática em relação à utilização dos equipamentos de soldagem e a determinação da região operacional do “keyhole” em termos de corrente, velocidade de soldagem e vazão de gás de plasma. Para tanto, será obtida uma condição inicial da literatura para, com os devidos ajustes, determinar-se os parâmetros de soldagem.

Na segunda etapa, serão feitas a determinação do envelope operacional do passe de raiz de uma junta chanfrada e a sua avaliação em termos de repetibilidade do cordão de solda, visando obter uma região operacional onde a condição do “keyhole” seja estável. A determinação do envelope operacional será feita através de um planejamento experimental (fatorial completo) dentro dos limites das variáveis de soldagem definidas na primeira etapa. A repetibilidade será testada com condições extraídas de dentro deste envelope e visa verificar se as características do cordão de solda serão mantidas em todos os testes.

Na terceira etapa, será realizado um estudo envolvendo fatores que poderiam influenciar na repetibilidade do processo. Tal estudo é justificado em função das dificuldades operacionais citadas na literatura para a soldagem por plasma em junta chanfrada (em V), podendo-se identificar o(s) fator(es) de maior influência na estabilidade do “keyhole” e que proporcionam as melhores condições de soldagem, minimizando a sensibilidade do processo às pequenas variações nos parâmetros de soldagem.

A apresentação do assunto é feita em 7 itens. No Capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica a respeito dos assuntos relacionados com o processo de soldagem por plasma. No Capítulo 3, é apresentado o procedimento experimental adotado para a realização deste trabalho. No Capítulo 4, são apresentados os testes preliminares e todo o desenvolvimento feito para se determinar a região operacional do “keyhole”. No Capítulo 5, são apresentados o planejamento do experimento e a determinação do envelope operacional. Foi feito, também, um estudo a respeito da não repetibilidade dos cordões de solda com as condições obtidas deste envelope operacional. As conclusões deste trabalho são apresentadas no capítulo 6 e, no capítulo 7, as propostas para trabalhos futuros. Posteriormente, no Item 8, são apresentadas as referências bibliográficas que foram utilizadas como suportes teórico e técnico para o desenvolvimento deste trabalho.

2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1- Introdução

A primeira aplicação prática do arco plasma como ferramenta de processamento de materiais ocorreu na metade da década de 50, quando Robert Gage, da Union Carbide Corporation, descobriu que as características do arco do processo GTAW poderiam ser significativamente modificadas através da sua constrição. Os resultados mostraram que o arco constricto possuía elevado grau de concentração de energia e estabilidade direcional, resultando em maiores temperaturas no arco e velocidades do jato de plasma em relação aos arcos convencionais. A partir das pesquisas realizadas, a Union Carbide Corporation lançou, em 1957, o primeiro equipamento comercial de corte a plasma. Pesquisas posteriores indicavam a possibilidade da aplicação do arco plasma ser estendida para operações de soldagem (AWS, 1991a e Craig, 1988).

Uma das primeiras aplicações do processo de soldagem por plasma ocorreu em meados dos anos 60, na montagem do foguete TITAN III-C. Nesta aplicação foi usada a corrente em polaridade direta. Equipamentos comerciais foram desenvolvidos e introduzidos no mercado a partir de 1963, embora pouco utilizados face às dificuldades operacionais e tecnológicas. No final dos anos 60, Van Cleave, da Boeing Company, implementou a soldagem por plasma para aplicações em corrente alternada. Desde então, muitas pesquisas foram realizadas e atualmente, o avanço tecnológico dos equipamentos de soldagem viabilizaram a sua utilização em escala industrial (AWS, 1991a e Craig, 1988).

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os assuntos que envolvem o processo de soldagem por plasma. Foram utilizados trabalhos publicados entre 1974 e 1998, pesquisados a partir do "Copendex Plus", "Current Contents Engineering, Computing & Technology", "Ismec" e periódicos relacionados com soldagem. Para a apresentação do assunto, este capítulo foi dividido em quatro itens distintos. No item 2.2, é feita uma descrição detalhada do processo, onde são abordados os princípios de funcionamento, as técnicas de soldagem e os equipamentos empregados. No item 2.3, é feita uma abordagem a respeito dos materiais e consumíveis empregados neste processo de soldagem. No item 2.4, é mostrada a influência de cada um dos parâmetros de soldagem sobre o processo e suas conseqüências sobre o cordão de solda. Finalmente, no item 2.5, é

feito um levantamento dos principais defeitos de soldagem, explorando para cada um destes, as causas e as medidas preventivas.

2.2- Processo de soldagem por plasma

2.2.1- Aspecto geral

O processo de soldagem por plasma (PAW) é um processo de soldagem que, assim como os processos SMAW, GMAW, GTAW e outros, se utiliza de um arco elétrico para a obtenção de fusão em peças metálicas, sendo considerado uma extensão do processo GTAW. No processo PAW, em contraste ao GTAW, o arco é forçado a passar por um orifício de diâmetro reduzido, sofrendo um efeito constritivo, ou seja, um estreitamento da coluna do arco (AWS, 1991a; Wainer et al., 1992 e Paula Jr, 1997).

Um bocal de constrição, colocado na saída da tocha, obstrui a passagem do arco na sua forma normal, resultando em intensas modificações nas características do jato de plasma. Os gases que compõem o jato de plasma adquirem velocidades extremamente altas na saída do orifício de constrição, como efeito da redução do diâmetro da passagem do fluxo de gás, forçando o arco a assumir o perfil geométrico do orifício. Estas duas características, o perfil do arco e a alta velocidade do jato de plasma, atuam conjuntamente para conferir rigidez, estabilidade direcional e grande concentração de energia ao arco plasma (AWS, 1991a e Wainer et al., 1992).

Quando se compara o arco constrito com um arco convencional, como por exemplo o do GTAW, verifica-se que as características do arco constrito proporcionam um melhor controle direcional, maior densidade de energia, menor ZAC (zona afetada pelo calor) e uma maior tolerância de variação na distância tocha-peça ("torch standoff"). Como consequência da elevada concentração de energia, o processo de soldagem por plasma pode ser utilizado em aplicações com altas penetrações, eliminando muitas vezes, passes intermediários e eventuais preparações de juntas (AWS, 1991a).

A configuração básica do bocal de constrição e os termos empregados para o sistema PAW são mostrados na Figura 2.1. A posição da ponta do eletrodo relativa à face do bocal constritor vai determinar o grau de constrição, ou seja, o grau de influência deste bocal na alteração das características do arco. Ao passar pelo bocal de constrição, o perfil do arco é alterado, sendo forçado a incidir sobre a peça em uma área circular de diâmetro similar ao do

orifício constritor. Este efeito é denominado de colimação e garante que a área da seção transversal do arco seja mantida constante ao longo de sua extensão, desde a sua saída do orifício constritor até a peça que está sendo soldada, mesmo que pequenas variações na distância tocha-peça venham a ocorrer. Isto garante, nestes casos, a manutenção da concentração de energia do arco e, portanto, das características do cordão de solda (AWS, 1991a).

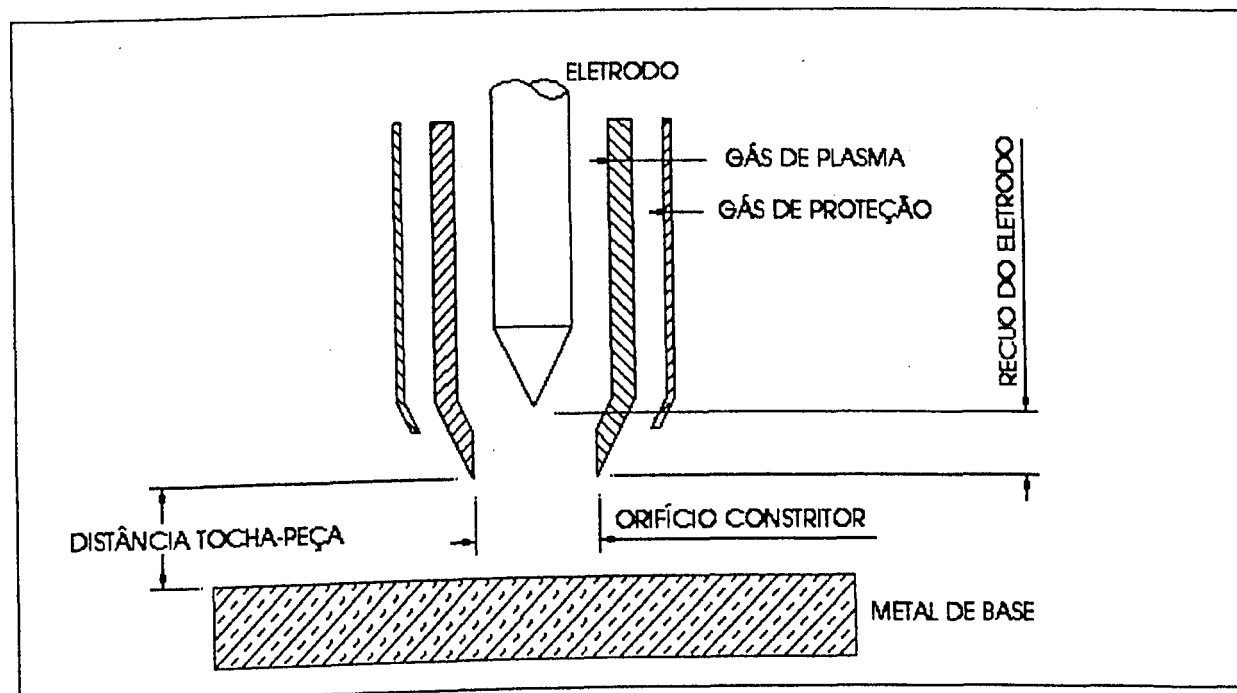


FIGURA 2.1: Bocal do processo PAW (AWS, 1991a).

O gás de plasma é um gás inerte que envolve o eletrodo de tungstênio dentro da câmara interna da tocha. Na soldagem, este gás é aquecido a ponto de ser ionizado, recebendo neste estado, a designação de plasma. A saída do plasma pelo bocal de constrição promove a formação do jato de plasma, ou seja, a coluna do arco de soldagem, responsável pelo transporte de cargas entre o eletrodo e a peça a soldar (AWS, 1991a).

O gás de proteção é o gás que efetivamente vai atuar para a proteção da solda contra a contaminação pelo ar atmosférico, podendo ser inerte ou ativo. Este gás flui por um bocal externo e envolve a área da peça sobre a qual o arco incide, formando uma barreira que impede a contaminação da solda. A necessidade de uma fonte auxiliar de gás decorre do fato

de que as altas velocidades imprimidas ao jato de plasma tornam o seu fluxo turbulento, não garantindo uma proteção eficiente da poça de fusão (AWS, 1991a e Lucas, 1978).

O posicionamento recuado do eletrodo em relação ao bocal de constrição torna difícil a abertura do arco de soldagem a partir dos métodos tradicionais. A abertura do arco de soldagem é feita através de um sistema de arco piloto. Neste sistema, um arco piloto de baixa intensidade é estabelecido entre o eletrodo e o bocal de constrição através de um ignitor de alta frequência. O arco piloto ioniza o gás de plasma, formando uma conexão condutora entre o eletrodo e a peça a soldar. Desta maneira, quando a fonte de energia é acionada, o arco principal é facilmente estabelecido, dando-se início à soldagem (AWS, 1991a e Lucas, 1978).

O grau de colimação, a força e a densidade de energia de um arco são funções da corrente, diâmetro e forma do orifício constritor, recuo do eletrodo, tipo e vazão do gás de plasma e do tipo e vazão do gás de proteção. A combinação entre estes parâmetros permite que o arco plasma seja utilizado em várias aplicações, dentre elas, operações de corte, soldagem e tratamento superficial de endurecimento (AWS, 1991a).

A maior desvantagem do processo PAW é o alto custo relativo do seu equipamento, o treinamento mais criterioso exigido para os soldadores e o grande número de parâmetros a controlar em uma faixa que é bastante estreita. A falta de informações técnicas e operacionais relacionadas ao processo PAW e o receio à adoção de novos processos também dificultam a sua utilização na indústria de fabricação (Houldcroft & John, 1988 e AWS, 1991a).

2.2.2- Constrição do arco

A constrição de um arco é um fenômeno no qual o arco é colimado quando obstruído por um orifício de pequeno diâmetro. Este fenômeno torna a área da seção transversal do arco praticamente constante ao longo de toda a sua extensão. Ao mesmo tempo que colima o arco, o orifício constritor obstrui o fluxo de gás, aumentando o seu perfil de velocidade e induzindo uma maior estabilidade direcional ao jato de plasma. Esta é uma das principais vantagens do processo PAW em relação aos processos que apresentam um arco cônico (aberto) como, por exemplo, o GTAW. A estabilidade direcional do processo PAW torna o seu arco bastante rígido, mais resistente à atração por conexões do circuito elétrico ou por deflexões produzidas por campos magnéticos e mais tolerante às variações na distância tocha-peça (AWS, 1991a).

Todas as modificações introduzidas no arco por efeito do orifício constritor (estabilidade direcional, concentração de energia e a forma cilíndrica do arco) são definidas

pelo grau de constrição imposto. O grau de constrição é um termo que quantifica o efeito do orifício constritor sobre as características do arco. Um elevado recuo do eletrodo juntamente com um orifício constritor de pequeno diâmetro, definem um alto grau de constrição que resulta em um cordão de solda de elevada penetração e bastante estreito. Um reduzido recuo do eletrodo juntamente com um orifício constritor de maior diâmetro, definem um baixo grau de constrição do arco e o resultado de soldagem é um cordão de solda mais largo e de baixa penetração (Thermal Dynamics Corporation, 1994).

A Figura 2.2 mostra o efeito da constrição do arco em relação ao arco aberto do processo GTAW. O lado esquerdo desta figura representa o arco não constrito do processo GTAW operando a 200 A na polaridade direta (CC-), em uma atmosfera protetora de argônio, que flui a uma vazão de 19 l/min. O lado direito ilustra um arco nas mesmas condições, constrito por um orifício de 4,8 mm de diâmetro. Sob estas condições, há ganhos de 30% na temperatura e de 100% na energia do arco em relação ao arco não constrito. O aumento da temperatura do arco ocorre com o aumento da densidade de corrente, sendo provocada pelo aumento da concentração do arco. O aumento da energia do arco se deve ao aumento da tensão de soldagem, que ocorre pelo aumento da resistência elétrica em função da redução do diâmetro da coluna do arco (AWS, 1991a).

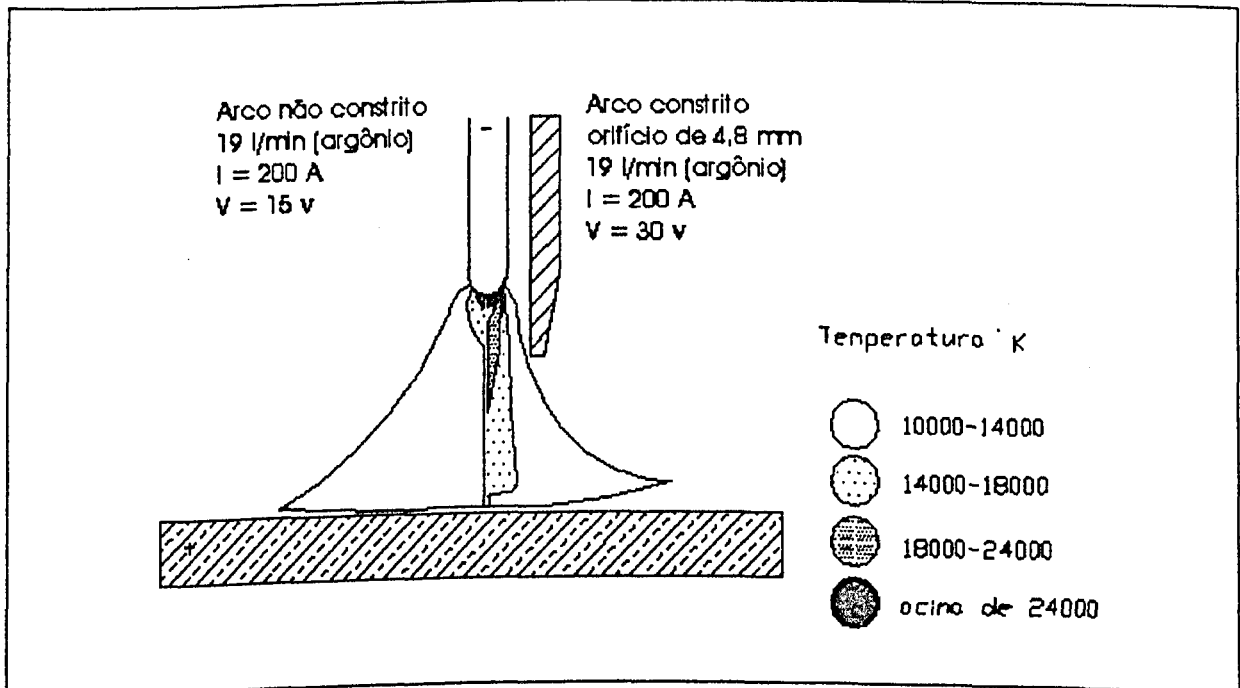


FIGURA 2.2: Efeito da constrição do arco sobre a temperatura e a tensão de soldagem (AWS,1991a).

2.2.3- Tipos de arco

No processo de soldagem por plasma, a solda pode ser conduzida com a utilização de dois tipos de arco: arco transferido e arco não transferido (AWS, 1991a e Pinfold & Jubb, 1973a). Estes dois tipos de arcos são mostrados na Figura 2.3.

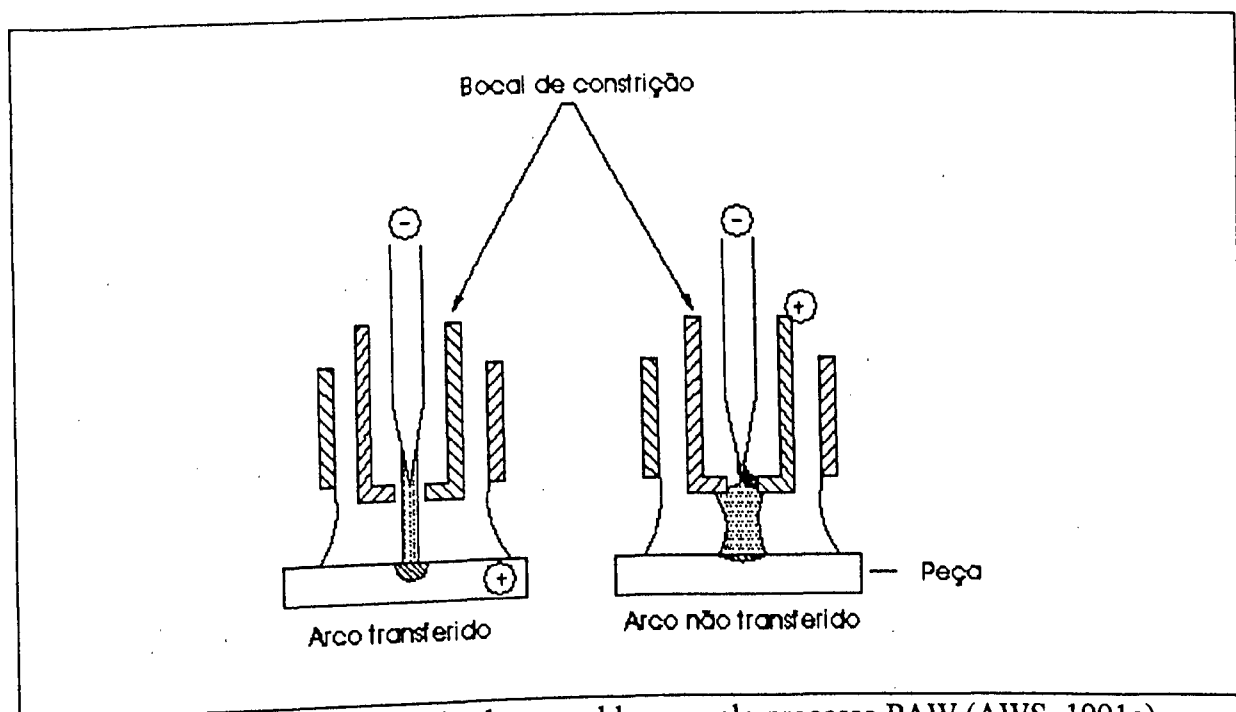


FIGURA 2.3: Tipos de arcos utilizados na soldagem pelo processo PAW (AWS, 1991a).

No arco transferido, o arco é estabelecido entre o eletrodo e a peça. Tanto a peça como o eletrodo são partes integrantes do circuito elétrico. Neste caso, o aquecimento da peça se dará pela passagem da corrente através do arco e através do próprio calor do jato de plasma que incide sobre a região da solda. Deste modo, o arco transferido, pela própria característica, transfere maior energia para a peça, sendo assim, o modo mais utilizado para a soldagem de metais (AWS, 1991a e Pinfold & Jubb, 1973a).

O arco não transferido é estabelecido entre o eletrodo e o bocal constritor. Neste caso, como não há passagem de corrente entre o eletrodo e a peça, a fusão do material de base é feita exclusivamente pelo calor transferido pelo jato de plasma. Em relação ao arco transferido, há uma menor quantidade de calor transferido para a peça, não sendo por isto, utilizado na soldagem dos metais. Entretanto, o fato da peça não ser parte integrante do

circuito elétrico, habilita o arco não transferido como ferramenta para o corte e a soldagem de materiais não condutores de eletricidade, ou a sua utilização em aplicações que requeiram baixa energia térmica (AWS, 1991a e Pinfold & Jubb, 1973a).

2.2.4- Técnicas de soldagem

As técnicas de soldagem são os modos de utilização do arco plasma para a soldagem. Basicamente, são três as técnicas de soldagem aplicadas ao processo PAW: micro-plasma, “melt-in” e “keyhole” (AWS, 1991a).

a) micro-plasma:

O processo de soldagem PAW com a técnica micro-plasma surgiu com o objetivo de propiciar a utilização da soldagem por plasma em níveis de correntes bastante reduzidos, menores que no processo GTAW. Esta técnica é normalmente utilizada em operações de soldagem de chapas finas, nas quais a intensidade da corrente não excede 25 ampères e cujas espessuras variem entre 0,01 e 1,5 mm (Houldcroft & John, 1988 e Santos & Quintino, 1993).

b) “Melt-in”:

Nesta técnica, a soldagem por plasma é empregada de modo convencional, produzindo soldas semelhantes às do processo GTAW. Esta técnica é utilizada com níveis de corrente que variam de 25 a 400 ampères, competindo com processo GTAW em termos de aspecto do cordão de solda. Entretanto, o modo “melt-in” é preferido ao processo GTAW para aplicações mecanizadas em virtude de melhoramentos obtidos com a constrição do arco, tais como: estabilidade direcional e concentração de energia. As aplicações da técnica “melt-in” incluem passes de enchimento em juntas chanfradas, soldagem de tubos e operações de revestimentos entre outras (AWS, 1991a e Craig, 1988).

c) “Keyhole”:

Quando a superfície de um metal é exposta a um feixe de energia concentrada superior a 10^9 W/cm², este começa a vaporizar. O efeito conjunto da pressão do feixe ou arco

e da pressão de vaporização criam condições para a formação de um pequeno orifício com formato de funil, o qual é usualmente chamado de “keyhole” ou buraco de fechadura. A poça de fusão estende-se através da peça a unir e é mantida pela força de tensão superficial (Kim et al., 1994).

O processo de soldagem por plasma é o único processo a arco elétrico capaz de operar nesta condição, condição esta que é atingida através de um adequado ajuste dos parâmetros de soldagem, permitindo ao jato de plasma atravessar completamente a peça sendo soldada para formar o “keyhole”. A formação e a manutenção do “keyhole” ao longo da solda são conseguidas através de certas combinações de vazão de gás de plasma, corrente e velocidade de soldagem, definidas para determinados tipo e espessura do metal de base (AWS, 1991a; Aquino & Damanet, 1984; Pinfeld & Jubb, 1973b e Keanini & Rubinsky, 1992).

A Figura 2.4 mostra o processo de soldagem através da técnica “keyhole”. Nesta situação, o volume máximo da poça de fusão e o perfil resultante do cordão de solda são determinados pelo balanço de forças entre a tensão superficial da poça de fusão e as forças decorrentes da corrente de soldagem e da velocidade do gás de plasma incidente (AWS, 1991a e Wainer et al., 1992).

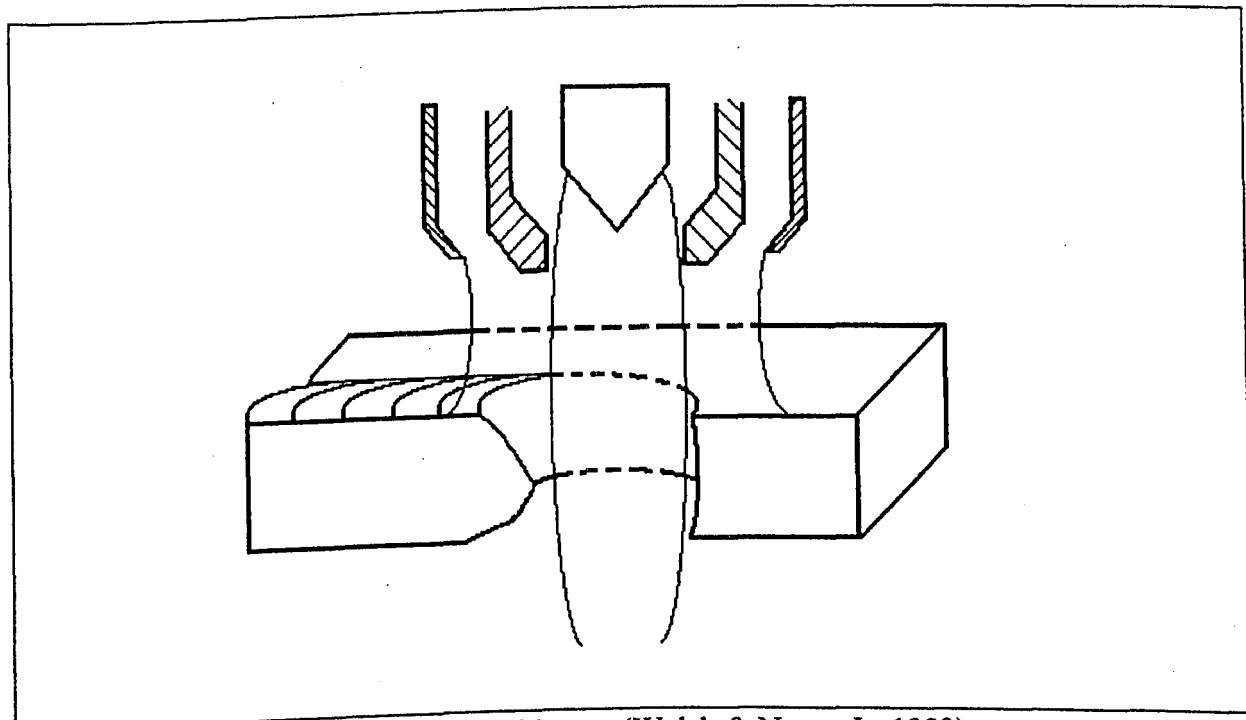


FIGURA 2.4: Técnica “keyhole” de soldagem (Walsh & Nunes Jr, 1989).

Em operações com a técnica “keyhole”, a medida que o arco penetra através do metal de base, a força do jato de plasma desloca o metal fundido para as extremidades da poça de fusão, abrindo o orifício do “keyhole”. O movimento de translação da tocha força o metal fundido a se deslocar em torno do jato de plasma em direção à parte posterior da poça de fusão, preenchendo o orifício do “keyhole” e formando, assim, o cordão de solda (AWS, 1991a).

A AWS (1991a) cita que a movimentação do metal fundido que ocorre na poça de fusão permite que impurezas ali depositadas fluam para a superfície antes de sua solidificação, minimizando problemas relacionados com inclusões. Além disto, o jato de plasma, que atravessa completamente o material de base, constitui um caminho de escape de gases, reduzindo a geração de porosidade e o aprisionamento de impurezas no cordão de solda.

A partir da abertura do arco, o jato de plasma começa a escavar e penetrar no metal de base, deslocando o metal que já se fundiu. Isto gera intensas perturbações na poça de fusão enquanto o “keyhole” não é formado, prejudicando o aspecto visual no início do cordão solda. Durante a extinção do arco, no final da solda, a velocidade de solidificação da poça de fusão pode impedir o fechamento e o preenchimento do orifício do “keyhole”, gerando uma irregularidade no cordão de solda.

Para soldagens longitudinais de chapas com espessuras de até 3 mm, o arco pode ser iniciado com os parâmetros nominais de soldagem pois, neste caso, a perturbação gerada não tem um efeito tão prejudicial sobre o cordão de solda. Na soldagem de chapas mais espessas, a perturbação da poça de fusão se torna mais acentuada, de modo que o arco deve ser iniciado em abas postiças com espessura de até 3 mm. Em ambos os casos, o arco deve ser extinto em abas postiças (Paula Jr, 1997; AWS, 1991a e Wainer et al., 1992).

Na soldagem circunferencial, onde a utilização de abas postiças é impraticável, torna-se necessário a utilização de um equipamento dotado de um programador que permita uma abertura do “keyhole” bastante suave. O arco é iniciado com baixas corrente e vazão do gás de plasma, que se elevam gradualmente até os valores nominais. Do mesmo modo, a extinção do arco deve ser efetuada com a redução gradual dos valores de corrente e vazão do gás de plasma, a partir dos valores nominais, para garantir o fechamento e preenchimento do orifício do “keyhole” (Paula Jr, 1997; AWS, 1991a e Wainer et al., 1992).

2.2.5- Equipamentos

Os equipamentos básicos utilizados na soldagem por plasma são apresentados na Figura 2.5. O conjunto de equipamentos de soldagem é composto por uma fonte de energia, console de controle, cilindros de gás de plasma e de proteção, medidores de vazão de gás, tocha de soldagem, sistema de refrigeração da tocha e acessórios.

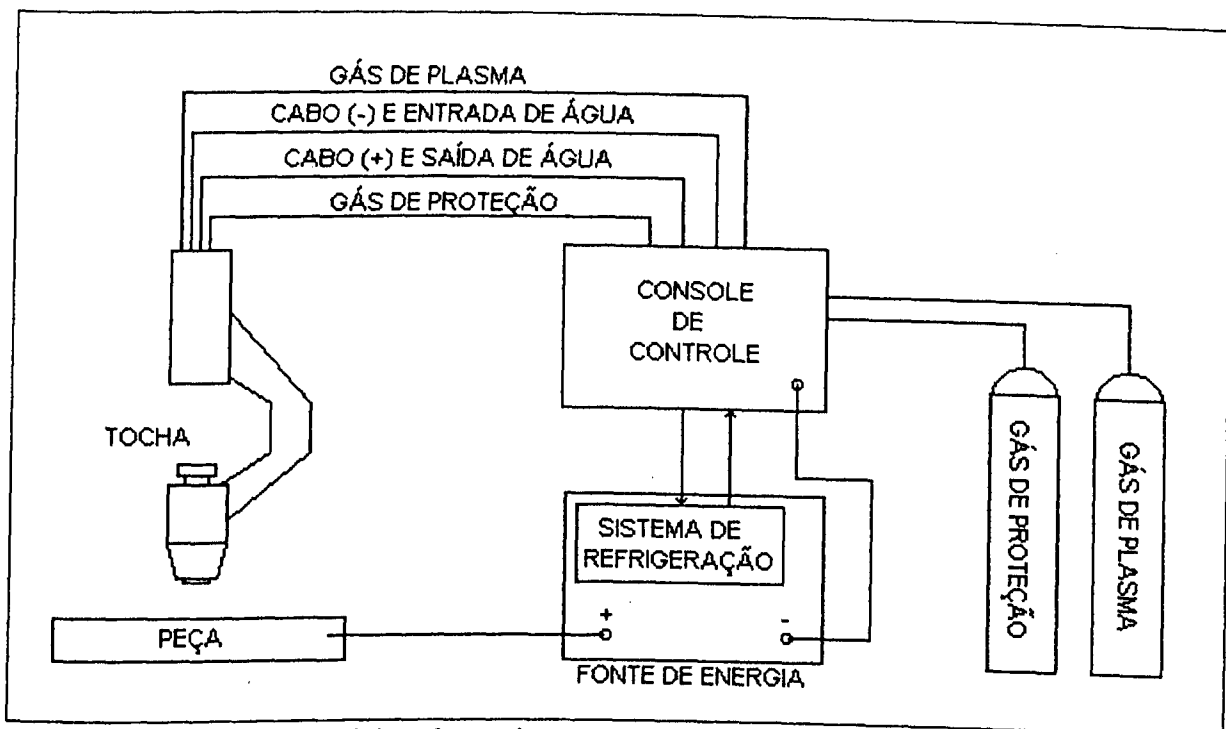


FIGURA 2.5: Conjunto básico de equipamentos utilizados na soldagem por plasma (AWS, 1991a).

a) Fonte de energia

A fonte de energia empregada no processo de soldagem por plasma deve apresentar uma característica estática de corrente constante. As fontes de energia atuais permitem que a soldagem seja feita em ambas as polaridades, CC- e CC+ e em polaridade variável, além de permitir a pulsação da corrente. Em qualquer uma destas condições, a soldagem é feita por imposição de corrente, isto é, com o valor da corrente de soldagem ajustado diretamente na fonte de energia (AWS, 1991a).

A tensão em vazio fornecida pela fonte de soldagem deve se situar entre 65 e 80 V para uma correta abertura do arco. A utilização de gases com elevado potencial de ionização, que dificultam a abertura do arco, requer energia adicional para manter a facilidade de acendimento do arco. Esta situação ocorre, por exemplo, com a utilização do hélio ou de misturas de argônio com hidrogênio como gás de plasma, onde uma tensão em vazio de 110 a 120 V é requerida para o correto acendimento do arco (AWS, 1991a e Pinfeld & Jubb, 1974a).

A refrigeração da tocha é feita através de um sistema de refrigeração embutido na própria fonte. O líquido refrigerante, normalmente a água, é impelido até o console de controle e posteriormente passa pela tocha de soldagem para a refrigeração das partes aquecidas.

b) Tocha de soldagem, arco piloto e console de controle

As tochas utilizadas no processo de soldagem por plasma apresentam um maior grau de complexidade do que as empregadas no processo GTAW. Várias passagens internas são necessárias para garantir o fluxo dos gases de plasma e de proteção e a circulação do fluido refrigerante. Os conduítes que conduzem o fluido refrigerante possuem internamente os cabos que fornecem corrente ao arco piloto (pólos positivo e negativo) e ao arco principal (pólo negativo).

O arco plasma não pode ser iniciado através das técnicas normais que são utilizadas no processo GTAW, uma vez que o eletrodo é mantido recuado em relação ao bocal de constrição. Um arco piloto de baixa corrente é estabelecido entre o eletrodo e o bocal de constrição através de um ignitor de alta frequência presente no console de controle. O arco piloto ioniza o gás de plasma, o que facilita a abertura do arco principal.

Existem dois projetos de tocha de soldagem para o sistema PAW, um para a soldagem com arco transferido e outro para a soldagem com arco não transferido. Em ambos os casos a tocha comporta os circuitos para a abertura dos arcos piloto e principal, os quais são mostrados na Figura 2.6. O bocal de constrição é conectado ao terminal positivo da fonte de energia através de um resistor. Após a abertura do arco piloto, que em ambos os modos é do tipo não transferido, o arco principal é acionado e estabelecido entre o eletrodo e a peça a ser soldada, quando da utilização do arco transferido, ou entre o eletrodo e o bocal de constrição no modo não transferido (AWS, 1991a e Pinfeld & Jubb, 1973a).

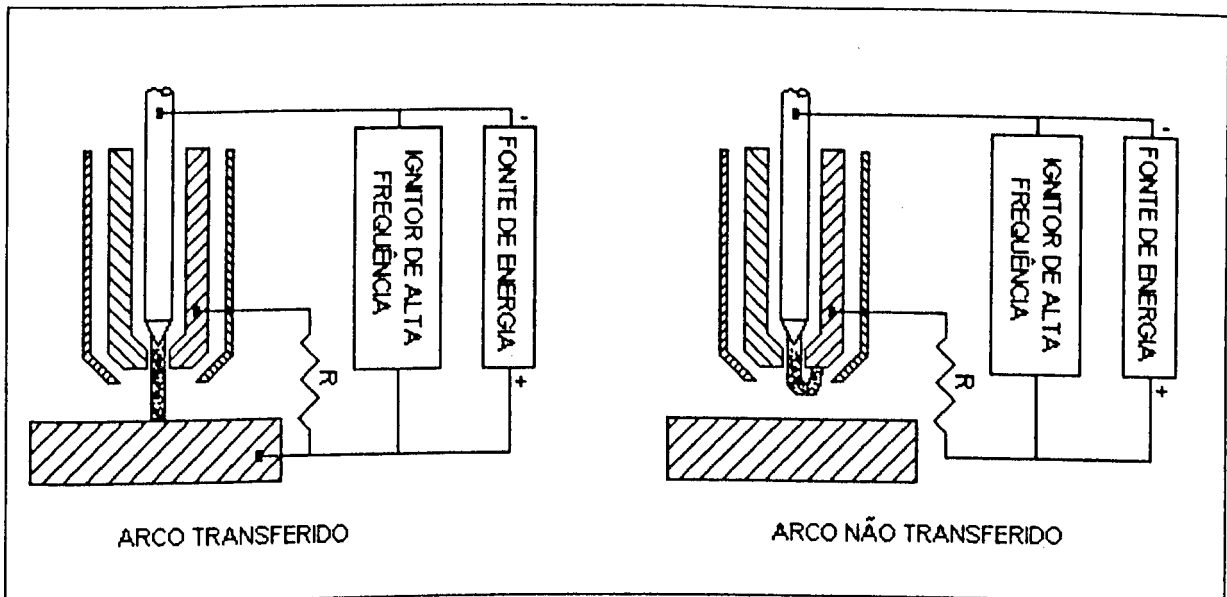


FIGURA 2.6: Circuitos para a abertura dos arcos piloto e principal nos modos transferido e não transferido de arco (Pinfold & Jubb, 1973a).

O console de controle é a parte do equipamento de soldagem que controla a abertura do arco piloto. Este dispositivo contém um ignitor de alta frequência e uma fonte de energia que fornecem um sinal de alta tensão em alta frequência, sobreposto a um sinal de corrente contínua de baixa intensidade para a abertura do arco piloto. Alguns consoles possuem controles para o ajuste da vazão dos gases de plasma e de proteção. Os consoles de controle mais modernos permitem também um aumento ou um decréscimo gradual da vazão do gás de plasma para minimizar a possibilidade de defeitos na abertura e na extinção do arco (AWS, 1991a).

c) Acessórios

Alguns acessórios são utilizados para complementar as funções de soldagem. Os dispositivos que podem ser incorporados ao sistema de soldagem são o alimentador de arame e o sistema para controle do comprimento do arco (AVC - "Arc Voltage Control") (AWS, 1991a).

O alimentador de arame é o mesmo utilizado no processo GTAW e permite que o metal de adição seja alimentado na poça de fusão a uma velocidade controlada. A utilização do metal de adição ajuda a minimizar a ocorrência de defeitos no cordão de solda por

permitir o preenchimento de mordeduras ou um melhor preenchimento da junta e, em alguns casos, tem finalidade metalúrgica (AWS, 1991a e Martikainen & Moisis, 1993).

O sistema para o controle do comprimento do arco permite a soldagem de peças perfiladas sem a alteração do comprimento do arco. O controle é feito através da leitura da tensão de soldagem, que é proporcional ao comprimento do arco. Embora o processo de soldagem por plasma seja pouco sensível às variações no comprimento do arco, dentro de uma faixa de trabalho, o sistema de controle deste é justificado porque garante a qualidade e homogeneidade da solda (AWS, 1991a).

2.3- Materiais

2.3.1- Gás de plasma

O gás de plasma é o gás que define o meio no qual o eletrodo estará em contato durante a operação de soldagem. A principal característica deste gás é a sua neutralidade em relação ao material do eletrodo, que apresenta uma reatividade muito acentuada em altas temperaturas e pode se deteriorar muito rapidamente quando em contato com o oxigênio, presente em gases ativos ou no ar atmosférico. A principal função do gás de plasma é servir de meio ionizante, ou seja, é o gás que vai ser aquecido até a sua ionização, formando o plasma, um meio condutor que permite o transporte de cargas entre o eletrodo e a peça e, deste modo, a abertura do arco (AWS, 1991a e Young, 1995).

O argônio é o gás mais utilizado e pode ser aplicado em todos os metais. É um gás que apresenta um custo relativamente baixo e grande disponibilidade quando comparado com outros gases inertes (He, Ar + He e Ar + H₂). A adição de hidrogênio ao argônio é feita para melhorar a transferência de calor e produzir um arco mais quente em relação ao argônio puro. Estas misturas não devem conter mais de 15% de hidrogênio, para evitar a ocorrência de porosidade e trincas no cordão de solda, além do risco de explosões, uma vez que o hidrogênio é combustível. Misturas de argônio com hidrogênio são utilizadas na soldagem de aços inoxidáveis, ligas de níquel e ligas de cobre-níquel e produzem uma atmosfera ligeiramente redutora, gerando soldas limpas. Devido à alta solubilidade do hidrogênio no metal líquido, misturas de argônio com hidrogênio só podem ser utilizadas com a técnica "keyhole" de soldagem, uma vez que o orifício gerado é um caminho de escape de gases e ameniza o problema de porosidade (AWS, 1991a; Pinfold & Jubb, 1974a e Craig, 1988).

O hélio também é um gás inerte que pode ser utilizado como gás de plasma. Este gás produz uma alta taxa de transferência de calor, melhorando a produtividade do processo. Pode ser utilizado em todos os metais, mas requer limpeza mecânica da camada de óxido na soldagem do alumínio. Entretanto, não é um gás muito utilizado devido ao seu alto custo de aquisição. Misturas de argônio com hélio são utilizadas onde o argônio puro e o hélio puro não fornecem bons resultados, sendo que o custo de aquisição é intermediário entre estes. Foi verificado que misturas de argônio com até 40% de hélio comportam-se como argônio puro e que, para porcentagens superiores a 75% de hélio na mistura, esta comporta-se como hélio puro (AWS, 1991a e Craig, 1988).

A Tabela 2.1 fornece as recomendações da AWS para a seleção do gás de plasma no processo PAW. A seleção de um determinado gás de plasma vai depender do tipo do material a ser soldado e da sua espessura.

TABELA 2.1: Recomendações da AWS para a seleção do gás de plasma (AWS, 1991a).

Material	Espessura (mm)	Técnica de soldagem	
		“Keyhole”	“Melt-in”
Aço carbono	< 3,2	Ar	Ar
	> 3,2	Ar	Ar + 75% He
Aços baixa liga	< 3,2	Ar	Ar
	> 3,2	Ar	Ar + 75% He
Aços inoxidáveis	< 3,2	Ar; Ar + 7,5% H ₂	Ar
	> 3,2	Ar; Ar + 5% H ₂	Ar + 75% He
Cobre	< 2,8	Ar	Ar + 75% He
	> 2,8	não recomendado(*)	He
Ligas de níquel	< 3,3	Ar; Ar + 7,5% H ₂	Ar
	> 3,2	Ar; Ar + 5% H ₂	Ar + 75% He
Metais reativos	< 6,4	Ar	Ar
	> 6,4	Ar + (50 a 75)% He	Ar + 75% He

* raiz da solda não é formada corretamente.

2.3.2- Gás de proteção

Embora a constrição do arco resulte em uma série de vantagens, o gás de plasma não tem ação protetora da poça de fusão muito eficiente. Devido a este fato, se faz necessário uma fonte auxiliar de gás para executar a proteção da solda contra a contaminação pelo ar da

atmosfera. A este gás é dada a denominação de gás de proteção. Além da função de proteção da solda, este gás atua diretamente sobre a poça de fusão e nas propriedades do arco, exercendo influência marcante nas características operacionais do processo e nas características geométricas do cordão de solda (Paula Jr, 1997 e Martinez et al., 1994).

O gás de proteção é normalmente inerte e do mesmo tipo que o gás de plasma. Entretanto, como não existe o contato deste com o eletrodo, gases ativos também podem ser utilizados para a proteção da solda. Os requisitos pressupostos para a seleção de um determinado gás de proteção, principalmente para gases ativos, são garantir a proteção da poça de fusão contra contaminação pela atmosfera e não comprometer as propriedades da solda (AWS, 1991a).

A transferência de calor entre o gás de proteção e o arco é um componente significativo no aquecimento da peça e nas características do cordão de solda. A perda de calor do arco para o gás de proteção resulta numa maior contração do arco, efeito semelhante à constrição mecânica do bocal de constrição. Por outro lado, o calor absorvido pelo gás de proteção pode ser liberado na poça de fusão, alterando as suas características (Evans et al., 1998 e Onsoien et al., 1995). A Tabela 2.2 apresenta algumas propriedades físicas de gases comumente utilizados em soldagem e que podem alterar as características do processo.

TABELA 2.2: Propriedades físicas dos gases aplicados à soldagem por plasma (AWS, 1991b; Novozhilov, 1988 e Oxigênio do Brasil S/A, 199-).

Gás	Potencial de ionização (eV)	Condutividade térmica a 0°C (cal/cm.s)x10 ⁻⁴	Densidade a 21,1°C (Kg/m ³)	Calor específico (Kcal/Kg) *
Ar	15,76	0,378	1,784	0,125
CO ₂	13,77	0,380	1,976	0,202
H ₂	15,43	4,720	0,090	3,418
He	24,59	3,320	0,178	1,251
N ₂	15,58	0,580	1,250	0,248
O ₂	12,07	0,584	1,429	0,219

* Calor específico à pressão constante.

A densidade do gás indica o grau da eficiência de sua ação de proteção da solda. Um gás com elevada densidade fornece uma proteção melhor da poça de fusão. Estes permanecem sobre a poça de fusão após a sua saída pelo bocal da tocha, formando uma verdadeira barreira gasosa que impede o ar atmosférico de atingir a região que está sendo

soldada. Gases com baixa densidade são arrastados com muita facilidade por correntes de ar e a proteção da solda irá requerer um maior fluxo destes gases (Young, 1995).

A condutividade térmica do gás de proteção vai implicar na maior ou menor retirada de calor do arco plasma. Gases de proteção com alta condutividade térmica retiram calor das laterais do arco, tendo uma forte ação de constrição. O calor retirado do arco e absorvido pelo gás de proteção pode ser transferido para a poça de fusão, aumentando as suas dimensões e melhorando a molhabilidade do metal líquido. Gases que apresentam capacidade de dissociação, quando aquecidos normalmente têm sua condutividade térmica elevada em relação ao seu estado normal (não dissociado). Isto ocorre porque toda a energia absorvida no processo de dissociação é liberada quando o gás se recombina novamente na forma molecular ao atingir peça sendo soldada (Novozhilov, 1988 e Martinez et al., 1994).

O potencial de ionização do gás de proteção também atua nas dimensões do arco plasma. Gases de proteção com baixo potencial de ionização podem sofrer uma ionização parcial, devido ao aquecimento pelo calor do arco. Nesta situação, o arco plasma engloba esta parcela de gás ionizado, tornando-se mais largo, o que reduz a densidade de energia e o poder de penetração do arco. Quando o potencial de ionização do gás é alto, este gás não sofre ionização parcial e o arco tende a permanecer bastante estreito (Martinez et al., 1994).

O calor específico do gás indica a sua capacidade de absorver e estocar calor. Um gás de proteção com alto calor específico absorve e estoca uma maior quantidade do calor perdido pelo arco. Quando este gás atinge a peça que está sendo soldada, o calor estocado é transferido na periferia do arco, melhorando a molhabilidade da poça de fusão (Hunt et al., 1997).

O argônio é o gás mais utilizado na proteção da solda, podendo ser aplicado em todos os metais. Este gás permite uma ação protetora eficiente e apresenta baixo custo relativo. Misturas de argônio com hidrogênio são utilizadas na soldagem de aços inoxidáveis, ligas de níquel e ligas de cobre-níquel. A quantidade de hidrogênio não deve exceder 15% da mistura para evitar o risco de explosões e a ocorrência de trincas e porosidade na solda. A adição do hidrogênio ao argônio melhora o efeito de constrição do arco, melhorando as características do processo. Esta mistura promove uma atmosfera protetora ligeiramente redutora, o que resulta em soldas limpas. A energia absorvida na dissociação é liberada quando o hidrogênio se recombina na forma molecular ao atingir a peça, transferindo elevada quantidade de energia para a poça de fusão (Young, 1995; Onsoien et al., 1995 e AWS, 1991a).

O hélio transfere maior quantidade de calor à peça em relação ao argônio puro, porém é pouco utilizado devido ao seu alto custo. A sua ação protetora não é muito eficiente, requerendo maiores fluxos de gases, cerca de duas a três vezes o requerido para o argônio puro. É utilizado na soldagem do alumínio, cobre e materiais reativos. As propriedades do hélio acentuam o efeito de constrição do arco, melhorando as características do processo. Misturas de argônio e hélio são utilizadas onde o argônio puro e o hélio puro não fornecem bons resultados e apresentam custo intermediário entre estes gases. Entretanto, misturas com menos de 40% de hélio comportam-se como argônio puro e misturas com mais de 75% de hélio comportam-se como hélio puro (AWS, 1991a e Young, 1995).

O nitrogênio é um gás pouco utilizado, mas pode ser empregado na soldagem do cobre e suas ligas. Gases ativos como o CO₂ e misturas de argônio com CO₂ ou com O₂ também podem ser utilizados. O CO₂ transfere grande quantidade de energia para a peça devido à sua dissociação (endotérmica) e posterior recombinação (exotérmica) ao atingir a peça. O oxigênio tem a ação metalúrgica de aumentar a fluidez da poça de fusão. Entretanto, gases ativos podem resultar na formação de escória, que pode ser minimizada pela adição de elementos desoxidantes através da alimentação do arame eletrodo (Novozhilov, 1988).

A seleção do gás de proteção está baseada no tipo e na espessura do material a soldar. A Tabela 2.3 mostra as recomendações da AWS para a seleção do gás de proteção no processo PAW.

TABELA 2.3: Recomendações da AWS para a seleção do gás de proteção (AWS, 1991a).

Material	Espessura (mm)	Técnica de soldagem	
		"Keyhole"	"Melt-in"
Aço carbono	< 1,6 > 1,6	não recomendado Ar; Ar + 75% He	Ar; Ar + 25% He Ar; Ar + 75% He
Aços baixa liga	< 1,6 > 1,6	não recomendado Ar + 75% He; Ar + 1,5% H ₂	Ar; He; Ar + (1-5)% H ₂ Ar; He; Ar + (1-5)% H ₂
Aços inoxidáveis	todas	Ar + 75% He Ar + (1-5)% H ₂	Ar; He Ar + (1-5)% H ₂
Cobre	< 1,6 > 1,6	não recomendado He; Ar + 75% He	Ar + (25 ou 75)% He; He He
Ligas de níquel	todas	Ar; Ar + (1-5)% H ₂ ; Ar + 75% He	Ar; He Ar + (1-5)% H ₂
Alumínio	< 1,6 > 1,6	não recomendado He	Ar; He He
Metais reativos	< 1,6 > 1,6	Ar; He; Ar + 75% He Ar; He; Ar + 75% He	Ar Ar + 75% He

* gás de plasma é o argônio em todos os casos.

A soldagem de materiais reativos, tais como o zircônio, titânio e tântalo, através da técnica “keyhole”, requer a utilização de uma outra fonte de gás para proteger a raiz da solda contra a oxidação. O gás que é direcionado para a raiz da solda é denominado de gás de purga. O gás de purga pode ser direcionado para a raiz da solda através de uma barra perfilada, como mostra a Figura 2.7, garantindo a proteção de toda a extensão do cordão de solda (AWS, 1991a).

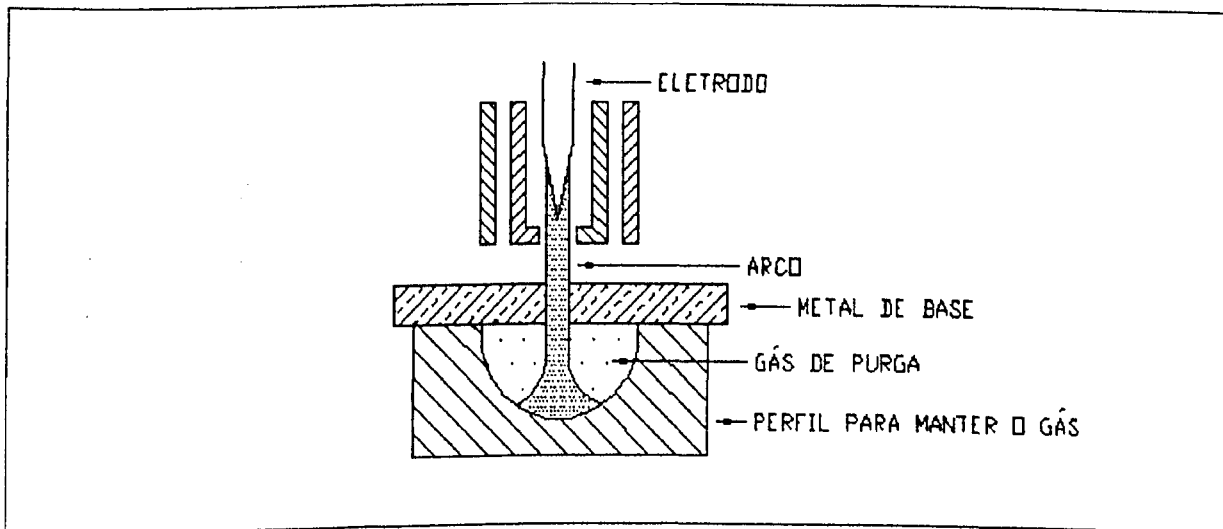


FIGURA 2.7: Esquema para a execução da proteção da raiz da solda (AWS, 1991a).

Em relação ao cordão de solda, o gás de purga vai determinar um pequeno resfriamento na raiz da solda, ajudando a minimizar problemas de penetração excessiva. Em relação ao arco, o gás de purga não tem nenhum efeito, pois estes não entram em contato. Portanto, quando for necessária a utilização de uma proteção gasosa na raiz da solda, pode-se decidir pela opção mais econômica. Dentro deste aspecto, uma proteção gasosa de argônio ou de dióxido de carbono pode ser utilizada sem nenhum problema, contanto que seja respeitada a afinidade destes gases com o metal de base. Em alguns casos, como na soldagem do cobre, o nitrogênio é gás que fornecerá os melhores resultados.

2.3.3- Material de base e tipo de junta

De maneira geral, todos os metais que podem ser soldados pelo processo GTAW também o podem pelo processo PAW. Dentre estes metais, pode-se citar como exemplos, os

aços carbono, de baixa liga e inoxidáveis e ligas de cobre, níquel, cobalto, alumínio, titânio e zircônio. Entretanto, devido à maior densidade de energia conseguida pela constrição do arco, o processo PAW fornece soldas mais estreitas e com maior penetração do que o processo GTAW, ampliando a faixa de espessura em que se obtém penetração total (AWS, 1991a).

O tipo de preparação de junta a ser utilizado em uma determinada aplicação do processo de soldagem por plasma é definido através da espessura do material de base. A Figura 2.8 mostra as preparações de juntas recomendadas para serem utilizadas na soldagem pelo processo PAW.

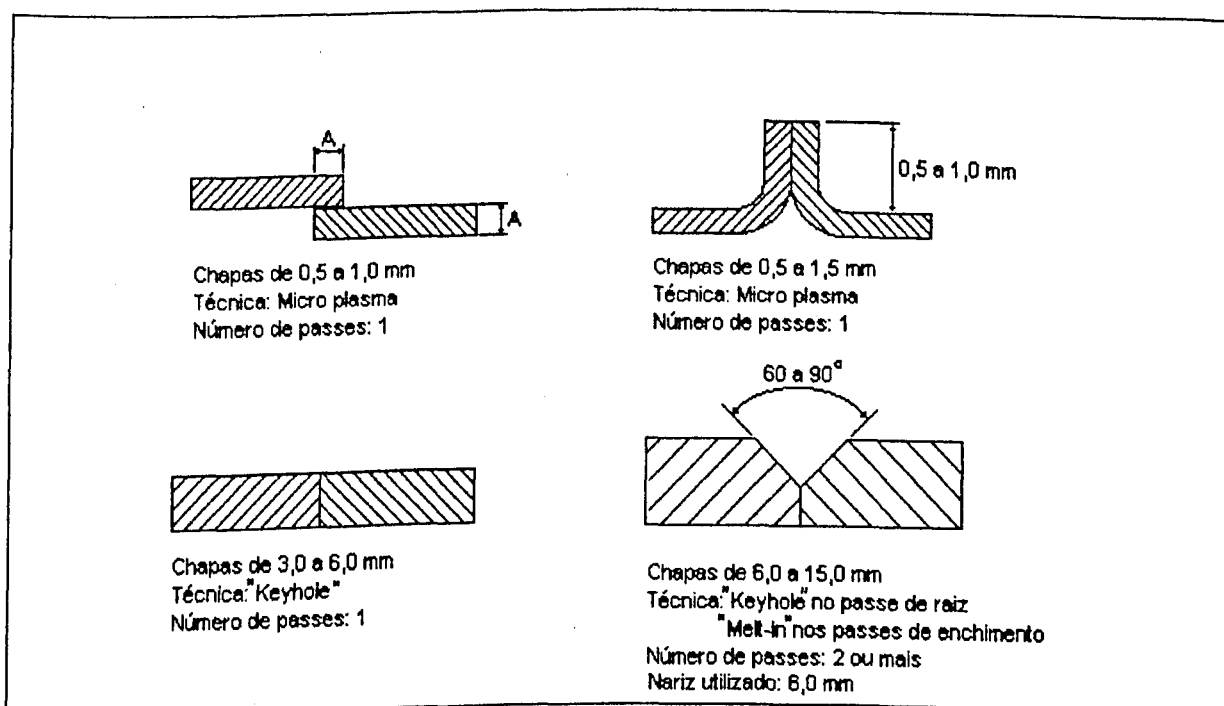


FIGURA 2.8: Juntas recomendadas para a soldagem por plasma (Paula Jr, 1997; Wainer et al., 1992).

Segundo a AWS (1991a), pode-se conseguir, utilizando-se a técnica "keyhole", penetração total em um único passe na maioria dos metais com espessuras entre 1,6 e 9,5 mm. Para o alumínio, a faixa de espessura na qual se pode conseguir penetração total, em um único passe, é ampliada para até 12,7 mm. Para aplicações em chapas cujas espessuras excedem estes limites, é recomendado a utilização de uma preparação de junta em V, com face da raiz (nariz) da junta de 6 mm (AWS, 1991a).

Para Kou (1987), soldas com um único passe podem ser executadas em juntas retas de topo com até 13 mm de espessura. Isto dependerá de condições apropriadas para a obtenção e manutenção do “keyhole”, ou seja, de combinações adequadas entre a vazão do gás de plasma, velocidade e corrente de soldagem.

Quintino et al. (1992) utilizou a técnica “keyhole” na soldagem de tubos de aço carbono e inoxidável de 10 mm de espessura, com uma preparação de bordos retos (junta reta de topo). Neste trabalho, é indicado que esta mesma condição poderia ser aplicada na soldagem do passe de raiz de chapas com 60 mm de espessura, na qual seria empregada uma preparação de junta em U com face de raiz de 9 mm. Entretanto, a situação do passe de raiz na junta em U, embora possa ter alguma analogia com a soldagem de uma junta reta de topo, não foi testada neste trabalho.

Santos & Quintino (1993) indicam que o processo de soldagem por plasma pode perfazer uniões de peças com até 6,5 mm de espessura, utilizando-se um único passe. Para Houldcroft & John (1988), a utilização do “keyhole” pode ser efetuada em peças com até 6 mm de espessura, que seria o limite para a manutenção da estabilidade do “keyhole” e da poça de fusão. Lucas (1978) cita que peças de até 6 mm de espessura podem ser soldadas com um único passe sem a necessidade de preparação dos bordos da junta.

Martikainen & Moisio (1993) utilizaram o processo PAW com a técnica “keyhole” na soldagem de aços estruturais não ligados e microligados. Para a soldagem de chapas de 6 mm de espessura, foi utilizada uma junta reta de topo. Nestas condições, foi identificada uma região operacional do “keyhole” relativamente extensa. Entretanto, na soldagem de chapas de 10 a 20 mm de espessura, com preparação em V e face da raiz da junta de 6 mm, não foi encontrada uma região operacional para o “keyhole”, sendo fornecida apenas uma única condição de soldagem para cada uma das espessuras de chapa utilizadas.

Como pode ser verificado na literatura, existem poucas informações a respeito da soldagem PAW com a técnica “keyhole” em juntas chanfradas. Este fato poderia estar relacionado com o aumento das dificuldades operacionais do processo nesse tipo de junta. Desta forma, pretende-se com este trabalho, obter e divulgar mais informações a respeito desta aplicação do processo PAW para preencher esta lacuna.

2.3.4- Material de adição

O material de adição utilizado no processo PAW é o mesmo empregado nos processos GTAW e GMAW. O material de adição é disponível nas formas de arames em bobinas ou varetas, podendo ser alimentado manual ou automaticamente. A composição do metal de adição varia conforme a aplicação. Uma das normas utilizadas para a especificação do metal de adição foi desenvolvida pela AWS, sendo que a seleção deste é feita em função das características (composição química) do material a ser soldado (AWS, 1991a).

2.3.5- Eletrodos

Os eletrodos utilizados no processo PAW são os mesmos utilizados no processo GTAW. As especificações dos eletrodos são definidas pela norma ANSI/AWS A5.12, publicada pela AWS - "American Welding Society". A edição mais recente é intitulada ANSI/AWS A5.12 - 92, especificações para eletrodos de tungstênio e ligas de tungstênio para soldagem e corte a arco, publicada em 1992.

2.4- Influência dos parâmetros de soldagem

2.4.1- Corrente

Corrente contínua em polaridade direta (CC-) é o tipo de corrente mais utilizada para a maioria das aplicações com o processo PAW. A polaridade direta é o modo mais utilizado na soldagem dos metais pois, a maior parte da energia gerada no arco incide sobre a peça e o desgaste do eletrodo é bastante reduzido. Isto ocorre porque o eletrodo é bombardeado por ions e a peça por elétrons. Os ions tem maior massa e menor velocidade que os elétrons. Como a energia é proporcional à massa e proporcional ao quadrado da velocidade, o aquecimento da peça será bem maior do que o do eletrodo e, nesta situação, o desgaste do eletrodo é menor (AWS, 1991a).

A corrente contínua pulsada também pode ser usada na soldagem por plasma, abrangendo todas as técnicas ("keyhole", "melt-in" e micro-plasma). Em corrente pulsada, a soldagem propriamente dita ocorre em pequenos intervalos de tempo chamados pulsos, momentos nos quais a corrente de soldagem atinge um valor máximo (corrente de pico). Fora dos intervalos de pulsos, a corrente fornecida (corrente de base) é suficiente para manter o arco estável, enquanto que a poça de fusão sofre um pequeno resfriamento. Esta condição

ameniza problemas de excesso de penetração e de deformação da peça a ser soldada (Dutra & Marqueze, 1993 e Pinfold & Jubb, 1974c).

Corrente contínua em polaridade inversa (CC+) é usada em curtos intervalos de tempo na soldagem do alumínio. A utilização da polaridade inversa tem a função de eliminar a camada de óxido refratário que se forma na superfície de materiais muito reativos e que inviabiliza a soldagem em polaridade direta. O excessivo aquecimento e conseqüente desgaste do eletrodo são as principais limitações da amperagem na soldagem com polaridade inversa. Isto ocorre em função da distribuição de calor entre a peça e o eletrodo. A peça, que corresponde ao polo negativo, dissipa cerca de 30% da energia enquanto que o eletrodo, que é o polo positivo, retém os 70% restante. Este fato limita a corrente de soldagem em 100 A quando a polaridade utilizada na soldagem for a inversa (AWS, 1991a).

A corrente alternada com onda senoidal auxiliada por um estabilizador de alta freqüência ou com onda retangular desbalanceada podem ser utilizadas na soldagem por plasma, abrangendo todas as técnicas. A faixa de corrente utilizada nestas condições, varia de 10 a 100 A, sendo este limite imposto pela excessiva deterioração do eletrodo quando este se constitui o polo positivo. A principal razão para a utilização da corrente alternada é a limpeza da camada superficial de óxido que se forma em algumas ligas e devido ao menor desgaste do eletrodo em relação à corrente contínua em polaridade inversa (AWS, 1991a).

Nos processos de soldagem por arco elétrico, o ajuste da corrente de soldagem está relacionada ao aporte de calor, sendo um dos principais parâmetros que influenciam na geometria do cordão de solda. O aumento da corrente de soldagem resulta numa maior quantidade de material fundido, ou seja, em uma poça de fusão maior. O poder de penetração do processo aumenta proporcionalmente com o aumento da corrente, devido ao aumento da pressão do arco e da densidade de energia, o que proporciona maiores velocidades de soldagem e produtividade (Quintino et al., 1992; Pinfold & Jubb, 1973b e Pang et al., 1993).

Na soldagem pela técnica "keyhole", as condições operacionais se mantêm estáveis para uma estreita faixa de variação da corrente de soldagem, situada entre penetração excessiva e penetração incompleta. O aumento excessivo da corrente em relação aos demais parâmetros de soldagem, pode levar o orifício do "keyhole" ao colapso, resultando em soldas com penetração excessiva ou no corte da junta. Isto ocorre porque este aumento na corrente gera forças que superam a força de tensão superficial (força que mantém a poça de fusão no lugar), desencadeando os efeitos citados. Por outro lado, níveis de corrente baixos demais em

relação aos outros parâmetros de soldagem, resultam na falta de penetração e na deterioração do acabamento superficial da solda (Pinfold & Jubb, 1973b e Yoshioka et al., 1993).

O nível de corrente também terá influência sobre a vida do bocal de constrição. A medida que a corrente de soldagem vai sendo aumentada, com os demais parâmetros constantes, um ponto de saturação na ionização do gás de plasma é atingido e o arco preencherá todo o espaço do orifício de constrição. Neste ponto, não existe nenhum gás isolante (não ionizado) entre o arco e a superfície do orifício de constrição e o calor gerado pelo arco é transferido muito rapidamente para o bocal. Esta condição pode dar origem ao fenômeno do arco duplo, que é a formação de dois arcos, um entre o eletrodo e o bocal de constrição e outro entre o bocal de constrição e a peça. O aquecimento gerado no bocal de constrição pode resultar na sua inutilização (Pinfold & Jubb, 1973b).

2.4.2- Velocidade de soldagem

A velocidade de soldagem é um dos parâmetros mais importantes na determinação da geometria do cordão de solda. Embora a velocidade de soldagem seja um parâmetro que não atue sobre as características do arco, esta atua de forma decisiva na taxa de calor transferido à peça por unidade de comprimento. Portanto, uma variação na quantidade de material de base fundido pode ser o resultado de um menor ou maior tempo de exposição do arco elétrico sobre uma determinada região da peça, ou seja, de uma maior ou menor velocidade de soldagem (Aquino & Damanet, 1984 e Quintino et al., 1992).

De uma maneira geral, velocidades de soldagem altas geram cordões de solda estreitos e com pouca penetração, podendo resultar na não formação do “keyhole” ou na ocorrência de mordeduras. Por outro lado, velocidades de soldagem menores geram cordões de solda com maiores penetração e largura, como resultado de uma maior quantidade de energia transferida por unidade de comprimento de solda. Entretanto, uma velocidade de soldagem muito baixa pode resultar no colapso da poça de fusão que, pelo aumento exagerado das suas dimensões, gera um desequilíbrio das forças que atuam na manutenção do “keyhole”, produzindo excesso de penetração ou o corte do metal de base (Pinfold & Jubb, 1973b).

No processo de soldagem por plasma, principalmente através da técnica “keyhole”, a faixa de velocidades em que uma determinada condição de soldagem se mantém estável é estreita. Esta faixa de velocidade de soldagem é delimitada pelo corte do metal de base em velocidades baixas e pela falta de penetração em velocidades de soldagem altas. Portanto,

uma vez estabelecida uma condição estável de soldagem, a velocidade de soldagem deve ser controlada de modo satisfatório para garantir a qualidade da solda (Paula Jr, 1997).

A baixa tolerância do processo PAW com a técnica “keyhole”, em termos de variação de velocidade de soldagem, é verificada no trabalho de Paula Jr (1997). Neste trabalho, onde foi utilizado uma chapa de aço carbono de 6,35 mm de espessura, corrente de 225 A e vazão de gás de plasma de 1,4 l/min., a obtenção e manutenção do “keyhole” só foi conseguida para velocidades de soldagem que variaram de 17,5 a 20 cm/min., ou seja, uma faixa operacional de 2,5 cm/min..

Verifica-se na literatura, que a soldagem do passe de raiz pela técnica “keyhole” em juntas em V, representa uma situação complicada, caracterizada por grandes dificuldades operacionais. Em todos os trabalhos de pesquisa feitos neste tipo de junta, apenas uma única condição de soldagem é apresentada, ou seja, um único valor de velocidade de soldagem. Este fato pode estar relacionado com o aumento das dificuldades operacionais em relação à soldagem em uma junta reta de topo ou com o aumento da instabilidade na manutenção do “keyhole”, para esta condição. Como esta é uma área pouco estudada, há a necessidade de estudos complementares para a verificação deste fato.

2.4.3- Tipo e vazão do gás de plasma

A vazão do gás de plasma tem uma importância significativa nas características geométricas do cordão de solda, assim como na obtenção do “keyhole”. O aumento do fluxo de gás de plasma resulta no aumento da velocidade do jato de plasma na saída do bocal de restrição e, portanto, no aumento da pressão do arco (pressão de estagnação) sobre a poça de fusão. Este aumento na pressão do arco permite a este deslocar uma maior quantidade do metal fundido da poça de fusão, melhorando as condições de formação do “keyhole”. Entretanto, a melhoria na manutenção do “keyhole” só é verificada até um certo valor, a partir do qual aumentos posteriores na vazão do gás de plasma aumentam muito as forças de arraste sobre a poça de fusão, levando cada vez mais a uma condição de penetração excessiva ou corte da junta (Quintino et al., 1992).

A faixa de estabilidade e manutenção do “keyhole”, para um determinado ajuste de parâmetros, é bastante estreita, dificultando as aplicações através desta técnica de soldagem. Uma mínima variação na vazão de gás de plasma, para mais ou para menos, pode deslocar a condição de soldagem para fora da faixa de estabilidade do “keyhole”. O resultado disto pode

ser a ocorrência de irregularidades no cordão de solda, tais como o corte da chapa ou penetração incompleta. Quando o arco não possui força suficiente para dar início ao “keyhole” (penetração incompleta), a agitação causada na poça de fusão resulta em um cordão de solda com um aspecto superficial grosseiro (Pinfold & Jubb, 1973b).

Segundo a AWS (1991a), a vazão do gás de plasma recomendada para as aplicações mais comuns varia de 0,25 a 5,0 l/min. Este limite é imposto para garantir a qualidade da solda, que pode ser prejudicada pela excessiva força do arco. Entretanto, para aplicações mecanizadas com elevado grau de controle dos parâmetros de soldagem, é possível utilizar vazões para o gás de plasma de até 13 l/min.

O hélio tem um alto potencial de ionização, o maior dentre os gases utilizados em soldagem, o que dificulta a abertura e a manutenção do arco. Normalmente, uma alta tensão em vazio deve ser fornecida pela fonte de energia, da ordem de 120 V, para garantir o correto acendimento do arco. Entretanto, esta mesma característica implica em um arco com grande energia disponível para a solda, ou seja, o arco apresenta uma maior tensão, que por si só já fornece uma indicação de uma elevada temperatura do arco. A sua baixa densidade implica em uma maior dificuldade de obtenção e manutenção do “keyhole” (pressão do arco reduzida), portanto, na necessidade de uma maior vazão de gás de plasma em relação aos outros gases utilizados. O seu alto calor específico e sua alta condutividade térmica garantem uma elevada taxa de transferência de calor para a poça de fusão, garantindo uma elevada penetração do cordão de solda (Lucas, 1978; Garcia & Norrish, 1995; Young, 1995 e Martinez et al., 1994).

O argônio apresenta um baixo potencial de ionização, o que corresponde a uma certa facilidade para a abertura e manutenção do arco. A tensão em vazio para a abertura do arco varia de 60 a 80 V, bem mais baixa do que o valor correspondente para a abertura do arco em uma atmosfera de hélio. A tensão do arco é relativamente baixa, demonstrando que a temperatura do arco com argônio é inferior à do arco com hélio. A sua densidade é bastante elevada, cerca de 10 vezes a do hélio, e garante uma pressão suficiente no arco para a abertura do orifício do “keyhole” para vazões de gás relativamente baixas. Por outro lado, a condutividade térmica e o calor específico do argônio são baixos e resultam em uma pior transferência de calor do arco para a peça a ser soldada e, portanto, na necessidade da utilização de uma maior corrente de soldagem. Isto também possibilita a manutenção de um filme de gás frio (não ionizado) entre o arco e a parede do bocal de constrição, o que reduz o desgaste do orifício constritor (Liebisch, 1978; Young, 1995 e Martinez et al., 1994).

Misturas de argônio e hélio são muito utilizadas e fornecem resultados intermediários entre o uso do hélio puro e do argônio puro. Entretanto, misturas de argônio com menos de 40% de hélio mantêm as mesmas características do argônio puro e misturas contendo mais de 75% de hélio mantêm as características de hélio puro (AWS, 1991a).

O hidrogênio é um gás que é normalmente adicionado ao argônio para aumentar a quantidade de calor transferido para a poça de fusão. O hidrogênio apresenta elevados calor específico e condutividade térmica e a quantidade adicionada ao argônio não deve exceder 15% da mistura devido aos riscos porosidade, trincas e explosões. O fato do hidrogênio se dissociar na forma monoatômica (processo endotérmico) e se combinar novamente na forma molecular (processo exotérmico) nas regiões frias do arco e na superfície da peça, permite a transferência de grande quantidade de energia para a peça. Apesar de seu baixo potencial de ionização, os arcos produzidos por misturas de argônio e hidrogênio requerem tensões maiores do que os arcos produzidos por hélio puro. Isto ocorre em virtude da energia consumida durante a dissociação e ionização do hidrogênio, que são processos endotérmicos, que retiram energia do arco e aumentam a tensão de soldagem. A adição de hidrogênio ao argônio permite aumentar a penetração devido à maior energia transferida para a peça (Pinfeld & Jubb, 1974a; Novozhilov, 1988 e Onsoien et al., 1995).

2.4.4- Tipo e vazão do gás de proteção

O gás de proteção é o gás que vai garantir a proteção da poça de fusão contra a contaminação pelo ar atmosférico, evitando a oxidação da solda. A vazão e o tipo do gás de proteção também têm uma grande contribuição nas propriedades do arco plasma e na regularidade e qualidade da solda (Urmston, 1996).

A vazão do gás de proteção vai definir a eficiência da ação protetora da poça de fusão. O aumento da vazão do gás de proteção, até um certo limite, reduz a chance do ar atmosférico penetrar pela proteção gasosa e contaminar a solda. Aumentos posteriores não mais têm efeito benéfico sobre a ação protetora do gás. O aumento exagerado da vazão de gás pode resultar em turbulência no fluxo de gás e comprometer, desta forma, a proteção da solda (Martinez et al., 1993).

O gás de proteção também atua no sentido de retirar calor do arco plasma, realizando um efeito de constrição sobre este, semelhante ao efeito de constrição mecânica do bocal de constrição. Quanto maior for a vazão do gás de proteção, maior será a quantidade de calor

retirado do arco. Este fato acarreta a perda da ionização da parte externa da coluna do arco que está em contato com o gás de proteção, tornado-a mais estreita e resultando em um arco mais concentrado e com maior poder de penetração (Martinez et al., 1994)

A AWS (1991a) recomenda que a vazão do gás de proteção deve se situar entre 10 e 30 l/min. para uma proteção correta e eficiente da solda. A escolha desta vazão depende do tipo do gás a ser utilizado. Paula Jr (1997) obteve boas condições de soldagem com a utilização de vazões entre 6,0 e 10 l/min., utilizando o argônio puro. Foi observado que valores fora desta faixa produziam soldas com descontinuidades superficiais, que se apresentavam sob a forma de uma depressão (afundamento) na parte central da superfície do cordão de solda.

O hélio é um gás que, na condição de gás de proteção, tem um forte efeito de constrição do arco porque, devido à sua alta condutividade térmica, retira grande quantidade de calor deste. O calor absorvido pelo hélio é transferido para a peça, melhorando a molhabilidade da poça de fusão. O arco adquire uma elevada temperatura devido ao efeito de constrição, facilitando a obtenção da penetração desejada. Porém, como meio de proteção, o hélio não é muito eficiente e, devido à sua baixa densidade, fluxos maiores são requeridos em relação aos outros gases para propiciar uma proteção adequada da poça de fusão (Hunt et al., 1997; Thermal Dynamics Corporation, 1994 e Martinez et al., 1994).

O argônio, por outro lado, é um gás que garante a proteção da solda, mesmo para vazões relativamente baixas, uma vez que este possui uma alta densidade. O seu baixo potencial de ionização cria condições para que ocorra a ionização parcial do gás de proteção, tornando o arco mais largo e diminuindo a concentração de energia. Os baixos calor específico e condutividade térmica do argônio indicam que pouco calor é retirado do arco e que pequena parcela do calor absorvido é transferido à peça (Liebisch, 1978 e Martinez et al., 1994).

Misturas de argônio com hélio apresentam resultados intermediários aos do hélio e argônio puros. A mistura do hélio ao argônio tem como finalidade propiciar um melhor rendimento em soldagem em relação ao argônio puro e reduzir o custo de aquisição em relação ao hélio puro. Os benefícios da adição do hélio ao argônio só começam a ser sentidos a partir de uma porcentagem de pelo menos 40% de hélio na mistura. Até este ponto, a quantidade de argônio é suficiente para que ocorra a ionização parcial do gás de proteção, do mesmo modo que ocorre com o argônio puro. A partir de 40% de hélio na mistura, a ionização parcial do gás de proteção começa a reduzir gradualmente pela redução da

quantidade de argônio, até atingir o comportamento do hélio puro a partir de 75% de hélio na mistura (Martinez et al., 1994; AWS, 1991a e Thermal Dynamics Corporation, 1994).

Misturas de argônio com hidrogênio também produzem um forte efeito constritivo no arco, devido à alta condutividade térmica do hidrogênio. O hidrogênio reduz a tensão superficial do metal fundido, melhorando a sua molhabilidade. Uma outra característica do hidrogênio é que atua de forma a aumentar o calor transferido à peça é a sua capacidade de dissociação. Quando o hidrogênio atômico (dissociado) atinge a peça ocorre a recombinação deste na forma molecular, processo este que libera grandes quantidades de energia. Além disto, o hidrogênio se combina com o oxigênio do ar para produzir vapor, que é liberado para a atmosfera, reduzindo o risco de oxidação da solda (Liebisch, 1978; Onsoien et al., 1995 e Thermal Dynamics Corporation, 1994).

O dióxido de carbono e misturas de argônio com 20 a 30% de dióxido de carbono podem ser utilizados como gás de proteção. Misturas de argônio com 25% de CO_2 são freqüentemente usadas na soldagem de chapas laminadas (AWS, 1991a). O dióxido de carbono tem baixos potencial de ionização, calor específico e condutividade térmica. Entretanto, o dióxido de carbono sofre a dissociação quando aquecido e, ao se recombinar na forma molecular, transfere uma quantidade de energia muito grande para a peça. O oxigênio liberado na dissociação do dióxido de carbono melhora a molhabilidade da poça de fusão, mas acarreta a formação de escória no cordão de solda pela sua reação com a poça de fusão. Misturas de argônio com oxigênio ou gases ternários também podem ser utilizados para a proteção da poça de fusão, sendo que o oxigênio tem um comportamento similar ao dióxido de carbono (Martikainen & Moisio, 1993 e Novozhilov, 1988).

O nitrogênio é outro gás que pode ser utilizado como gás de proteção. Normalmente é empregado na soldagem do cobre e de suas ligas. A solubilidade do nitrogênio no cobre é muito baixa e, por esta razão, a sua utilização não gera problema na soldagem destes materiais. Entretanto, não é recomendado para a soldagem de aços inoxidáveis e carbono por causar a redução da tenacidade. Por outro lado, foi observado que misturas de argônio com 5% de nitrogênio aumentam a quantidade de austenita em aços inoxidáveis duplex, melhorando a resistência destes materiais à corrosão. O nitrogênio é normalmente empregado como gás de purga na soldagem do cobre e suas ligas e dos aços inoxidáveis (Paula Jr, 1997).

2.4.5- Distância tocha-peça (“torch standoff”)

A natureza colunar do arco constrito faz do PAW um processo pouco sensível às variações na distância tocha-peça, permitindo a utilização de comprimentos de arcos bem maiores que os possíveis nos processos convencionais. Esta propriedade facilita a manipulação da tocha por parte do soldador e a utilização de dispositivos para efetuar a alimentação do metal de adição (AWS, 1991a).

O grau de influência da distância tocha-peça sobre o cordão de solda depende muito do recuo do eletrodo em relação ao bocal de constrição e do diâmetro do orifício constritor, ou seja, do grau de constrição do arco. Quanto maior é o recuo adotado para o eletrodo e menor o diâmetro do orifício constritor, maior é o efeito de constrição do arco, tornando-o mais colimado e, portanto, menos sensível à variação da distância tocha-peça (Thermal Dynamics Corporation, 1994).

Para aplicações com a técnica “keyhole” de soldagem, onde são utilizados maiores recuos para o eletrodo, o efeito da distância tocha-peça não é significativo em virtude do arco apresentar um alto grau de colimação. Quando da utilização de pequenos recuos para o eletrodo, que é comum para a técnica “melt-in” de soldagem, o arco é submetido a um pequeno grau de colimação, assumindo uma forma mais cônica. Nesta situação, a variação da distância tocha-peça, mesmo dentro dos limites normais, resulta na alteração das características do cordão de solda, do mesmo modo que ocorre no processo GTAW. Desta forma, quanto maior é a distância tocha-peça, menor a penetração e maior a largura do cordão devido ao aumento da área de incidência do arco sobre a peça (AWS, 1991a).

O aumento excessivo da distância tocha-peça resulta na perda das características do arco, que se torna cônico, mesmo com a utilização de um elevado grau de constrição. Neste caso, o cordão de solda apresentará uma largura maior, uma menor penetração e um acabamento ruim. Isto advém da perda de estabilidade do arco e da turbulência gerada no jato de plasma, devido ao aumento da diferença de pressão entre a parte superior e inferior do arco (Hoffmeister et al., 1996).

Por outro lado, a utilização de uma distância tocha-peça muito reduzida pode causar o contato entre o bocal de constrição e o metal fundido da poça de fusão. Se este contato se efetuar durante a soldagem, o bocal de constrição será inutilizado e a solda será contaminada pelo material do bocal que é transferido para a poça de fusão (Hoffmeister et al., 1996 e Pinfeld & Jubb, 1974a).

Paula Jr (1997) estudou o efeito da variação da distância tocha-peça. Os seus resultados mostram que distâncias tocha-peça entre 2,0 e 6,0 mm fornecem boas condições de soldagem. Para valores acima de 6,0 mm, a estabilidade do "keyhole" fica prejudicada pela intensa turbulência gerada no arco. No outro extremo, valores menores que 2,0 mm possibilitam o contato entre o bocal de constrição e a poça de fusão.

2.4.6- Diâmetro e forma do orifício do bocal constritor

O diâmetro do orifício do bocal constritor tem uma influência marcante no processo de soldagem por plasma. Sob as mesmas condições de soldagem, a concentração de energia, o grau de constrição e a pressão do arco serão tanto maiores quanto menor for o diâmetro do orifício do bocal constritor e, portanto, maior é o poder de penetração do arco plasma. Entretanto, a capacidade de corrente utilizável fica cada vez mais reduzida a medida em que menores diâmetros de orifícios são utilizados, fato este ligado ao aumento da temperatura do arco de soldagem e ao aparecimento do fenômeno do arco duplo (Quintino et al., 1992; Pinfold & Jubb, 1974a e Miyazaki et al., 1995).

Uma grande variedade de bocais de constrição foram projetados, ao longo dos anos, para o uso no processo PAW. Estes podem apresentar um único orifício central ou múltiplos orifícios com furos dispostos em círculos, linhas ou em outros modelos geométricos.

Os bocais mais utilizados são os que apresentam um simples orifício central pelo qual o arco e todo o volume de gás de plasma passam. O bocal com múltiplos orifícios mais utilizado é o que apresenta um orifício central com dois pequenos orifícios adjacentes, todos dispostos em linha. Neste caso, o arco e parte do gás de plasma passam pelo orifício central, enquanto que a outra parte do gás de plasma passa pelos outros dois orifícios auxiliares. Durante a soldagem, um fluxo de gás relativamente frio proveniente dos orifícios auxiliares atua para concentrar mais o arco, tornando-o ligeiramente elíptico. A Figura 2.9 mostra o efeito dos orifícios auxiliares na forma do arco em relação ao bocal com um único orifício. Se o arco elíptico do bocal de múltiplos orifícios for ajustado corretamente com relação à direção de soldagem, uma ZAC mais estreita será produzida e a velocidade de soldagem poderá ser aumentada cerca de 50 a 100% sobre as obtidas com o bocal de um só orifício (Pinfold & Jubb, 1974a).

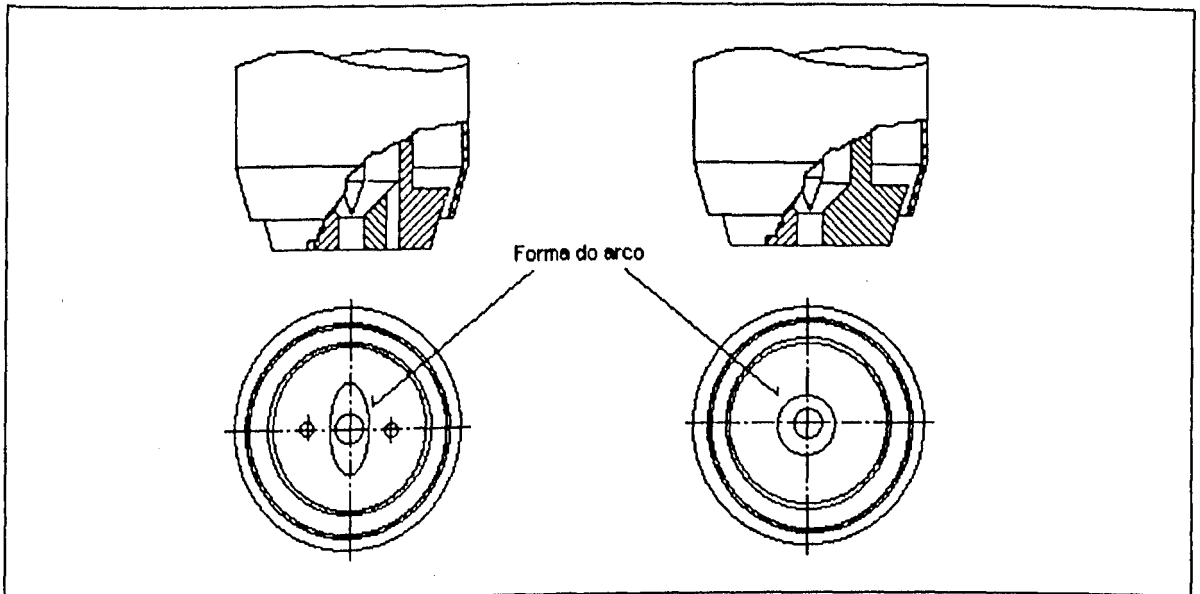


FIGURA 2.9: Forma do arco em função do tipo do bocal de constrição (Pinfold & Jubb, 1974a).

Existem três formas básicas nas quais o orifício constringente pode ser confeccionado. O formato mais usual é a forma cilíndrica. Em menor escala de uso, estão os orifícios com as formas cônica convergente e cônica divergente. O ângulo de convergência ou divergência dos orifícios cônicos normalmente é de 15° (Shaw Jr, 1980 e AWS, 1991a). A Figura 2.10 mostra os tipos de bocais quanto à sua forma, mostrando também o efeito sobre a coluna do arco.

Os bocais com orifício cônico convergente são os que apresentam melhores resultados em performance de soldagem, enquanto que os bocais com orifício cônico divergente apresentam os piores. Os bocais com orifício cilíndrico convencional apresentam resultados intermediários entre o cônico convergente e o cônico divergente. O maior efeito da forma do orifício do bocal de constrição na soldagem, está na área da seção transversal do arco. Devido a um fenômeno denominado de constrição pneumática, o bocal com orifício cônico convergente fornece um arco mais estreito, de menor área de seção transversal e, portanto, mais concentrado do que os bocais de orifício cilíndrico. Este efeito de constrição extra, ocorre porque em bocais convergentes o arco é constantemente forçado a reduzir a área de sua seção transversal, o que não ocorre em bocais divergentes. Os bocais com orifício cônico divergente não geram o efeito de constrição pneumática e, por isto, fornecem arcos menos concentrados em relação às outras duas formas de orifícios de bocais (Shaw Jr, 1980).

Em comparação com o orifício cilíndrico, os orifícios cônicos convergentes fornecem arcos com maiores tensão, temperatura e poder de penetração, gerando soldas com maiores

razões de aspecto (razão entre penetração e largura da solda). Os bocais com orifício cônico divergente fornecem o efeito oposto em todos os itens abordados, de modo que o cordão de solda apresentará uma geometria com menor razão de aspecto (Shaw Jr, 1980).

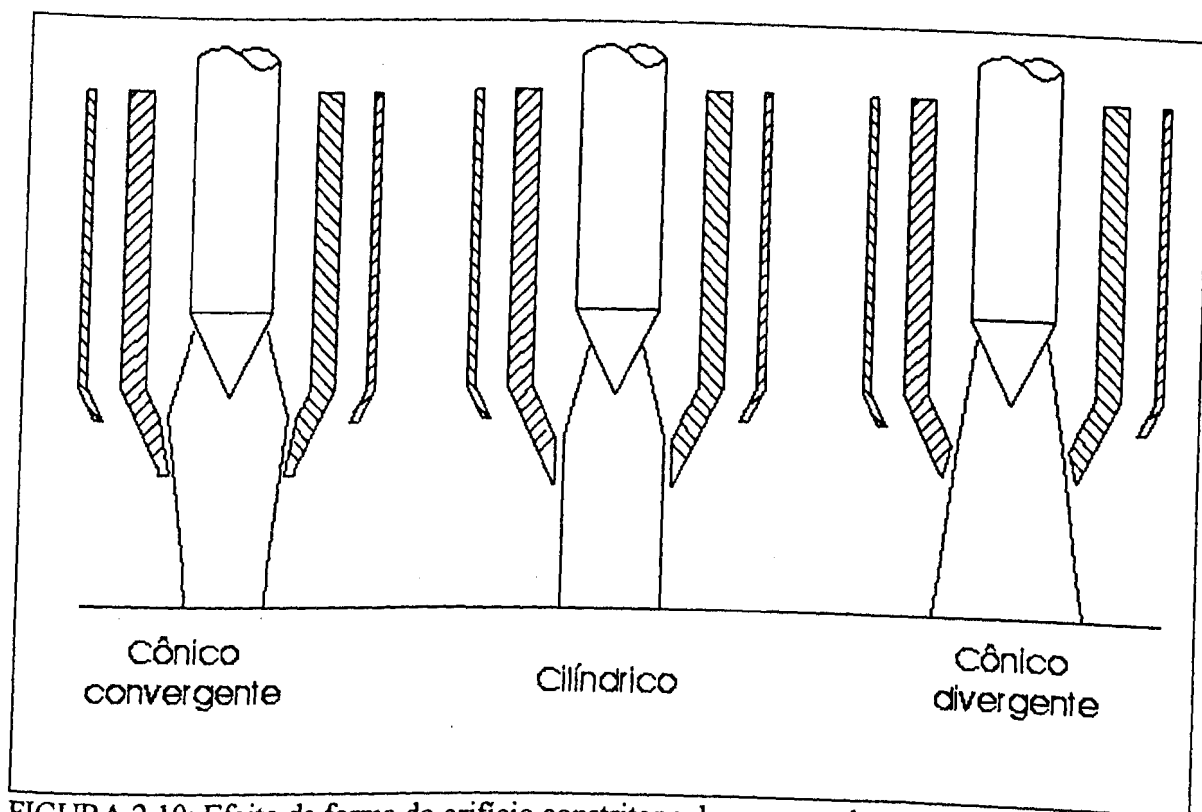


FIGURA 2.10: Efeito da forma do orifício constritor sobre o arco plasma (Shaw Jr, 1980).

2.4.7- Ângulo de ponta do eletrodo

O ângulo de ponta do eletrodo é um parâmetro que não influencia significativamente as características geométricas do cordão de solda. Os possíveis efeitos produzidos por este parâmetro são eliminados com a utilização do bocal constrição, uma vez que o arco assume o perfil do orifício constritor, tornando-se cilíndrico (Paula Jr, 1997). Pinfeld & Jubb, (1974a) citam que o ângulo de ponta do eletrodo tem pouca influência na aparência superficial, penetração ou dimensões do cordão de solda quando são utilizadas altas vazões de gás de plasma. Entretanto, para baixas vazões de gás de plasma, uma redução da penetração e na qualidade superficial da solda ocorre com o aumento do ângulo de ponta do eletrodo de 30°

até 90°. Isto ocorre em função da redução da tensão de soldagem (energia do arco) propiciada por uma redução gradual do comprimento do arco.

Para manter uma mesma área de emissão de elétrons, o arco tende a subir mais pelas laterais da ponta do eletrodo a medida que se reduz o seu ângulo de ponta. Isto resulta em um ligeiro aumento do comprimento do arco para ângulos de ponta menores, tendendo a tornar o arco mais aberto e com uma maior tensão de soldagem. Entretanto, a interferência causada pela obstrução do arco por parte do bocal constritor resulta na formação de um arco cilíndrico, eliminando, desta forma, o efeito causado pelo ângulo de ponta do eletrodo. Por outro lado, a medida que o recuo do eletrodo se torna menor, cada vez mais o arco do processo PAW se assemelha ao arco do processo GTAW. Portanto, nas condições em que o recuo do eletrodo for muito pequeno, o ângulo de ponta do eletrodo poderá influenciar as características do cordão de solda de modo semelhante ao que ocorre no processo GTAW (Pinfold & Jubb, 1974a).

Com relação à forma da ponta do eletrodo, existem duas opiniões entre os fabricantes de como esta deve ser. Alguns fabricantes de equipamentos de soldagem por plasma recomendam que a ponta do eletrodo deva ser truncada (tronco-cônica), enquanto que outros preferem a forma cônica convencional. Experimentos indicam que a forma cônica facilita a abertura do arco piloto. Isto ocorre porque a ponta do eletrodo se torna o ponto preferencial de emissão de elétrons, o que facilita a geração da diferença de potencial necessário para a abertura do arco piloto. A forma truncada de ponta de eletrodo facilitaria os ajustes do recuo do eletrodo. O ajuste do recuo do eletrodo é feito introduzindo-se um padrão na abertura no orifício constritor e, como os eletrodos com ponta truncada apresentam uma maior superfície de apoio, estes facilitam este tipo de ajuste (Pinfold & Jubb, 1974a).

2.4.8- Recuo do eletrodo (“electrode setback”)

Este parâmetro determina a distância em que o eletrodo é recuado em relação à face do bocal de constrição. O seu ajuste atua sobre o grau de constrição do arco, influenciando, portanto, na rigidez do arco e na penetração da solda.

O efeito da variação do recuo do eletrodo pode ser observado na Figura 2.11. A utilização do máximo recuo é feita em situações onde se deseja arcos bastante rígidos e constritos. Neste caso, os cordões de solda produzidos são estreitos e apresentam elevada profundidade de penetração. Esta situação normalmente é empregada na soldagem através da

técnica “keyhole”, na qual a alta concentração de energia é um requisito que deve ser satisfeito para garantir a total penetração do arco.

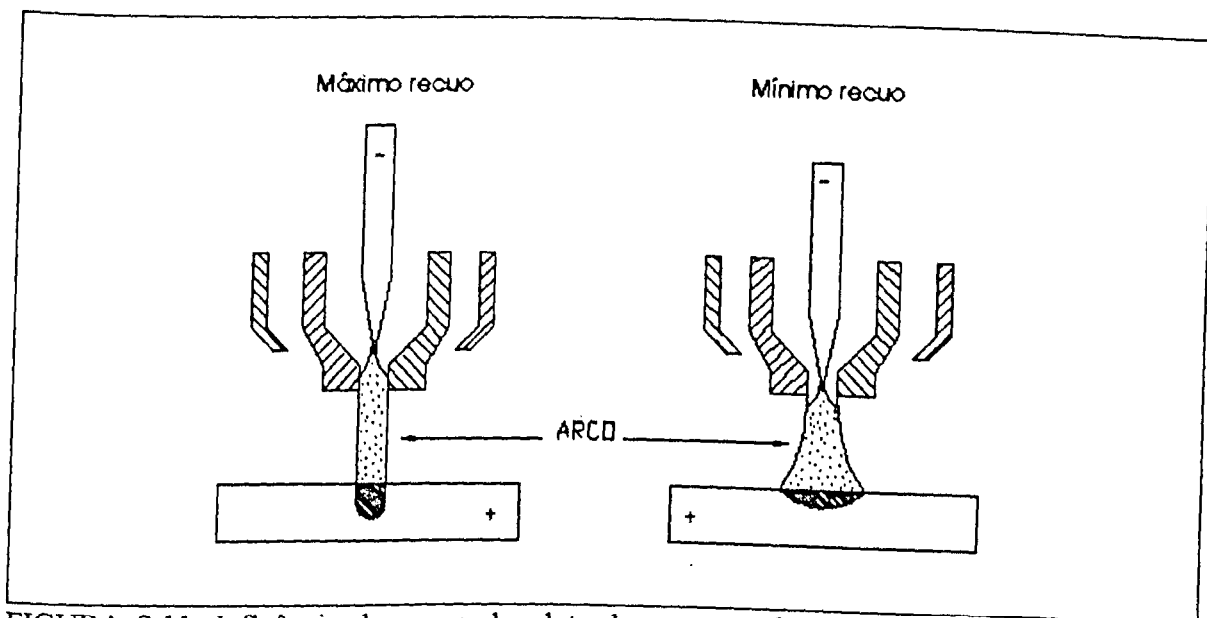


FIGURA 2.11: Influência do recuo do eletrodo no grau de constrição do arco (Thermal Dynamics Corporation, 1994).

A medida que se reduz o recuo do eletrodo, cordões cada vez mais largos e com menor profundidade de penetração são obtidos. Esta mudança nas características geométricas do cordão de solda se deve à redução do efeito de constrição, culminando na geração de uma maior área de incidência do arco sobre a peça. As alterações da geometria do cordão de solda, provocadas pela alteração do recuo do eletrodo, ocorrem pela variação da concentração de energia sobre a peça. Pequenos recuos do eletrodo são observados na soldagem pela técnica “melt-in”, onde normalmente não é exigido o requisito de alta penetração. Os passes de enchimento de juntas são exemplos da aplicação de um menor recuo do eletrodo. Deve-se ressaltar que a redução do recuo do eletrodo acarreta uma maior obstrução da saída do gás de plasma, aumentando a velocidade do jato de plasma e podendo aumentar a penetração se este efeito for superior ao efeito de perda da concentração de energia (Thermal Dynamics Corporation, 1994).

A redução do recuo do eletrodo permite a utilização de uma menor vazão do gás de plasma, para os mesmos níveis de corrente. Isto ocorre devido à não exigência de uma elevada penetração de alguns passes. Este fato contribui também para a utilização de uma

maior velocidade de soldagem, aumentando a produtividade (Thermal Dynamics Corporation, 1994).

Normalmente, os valores máximo e mínimo para ajuste do recuo do eletrodo variam conforme o equipamento (tocha de soldagem) e são definidos pelo fabricante. Por exemplo, a tocha de soldagem a plasma PWM-300, fabricada pela Thermal Dynamics Corporation, possui uma faixa de ajuste para o recuo do eletrodo que varia de 0,8 a 2,36 mm.

2.5- Defeitos de soldagem relacionados ao processo PAW

Defeitos de soldagem são descontinuidades que são incorporadas ao cordão de solda. Estas descontinuidades podem se apresentar na superfície ou internamente ao cordão de solda e estão relacionadas com a utilização de procedimentos e ajustes de parâmetros de soldagem inadequados. A falta de robustez do equipamento também pode resultar no aparecimento de defeitos nos cordões de solda. Os defeitos de soldagem devem ser evitados, principalmente em operações de alta responsabilidade, porque estes atuam como pontos concentradores de tensão e reduzem a resistência mecânica do cordão de solda (AWS, 1991a).

O processo PAW, principalmente através da técnica “keyhole” de soldagem, é muito sensível à variação no ajuste dos parâmetros de soldagem. Isto o torna muito susceptível ao aparecimento de defeitos de soldagem. Entretanto, após um ajuste correto dos parâmetros e condições de soldagem, o processo PAW fornece soldas com alto nível de qualidade e com grande produtividade (Pinfold & Jubb, 1974b).

Os defeitos mais comuns na soldagem pelo processo PAW são: mordedura, porosidade, trinca a quente, vazios (“tunneling”), “humping”, falta de penetração e contaminação da solda (Pinfold & Jubb, 1974b e AWS, 1991a). A Figura 2.12 ilustra de forma esquematizada estes tipos de defeitos.

a) Mordedura

A mordedura é um tipo de descontinuidade que se caracteriza pela formação de um entalhe nas bordas dos cordões de solda. As variáveis mais importantes no controle da mordedura são a velocidade e a corrente de soldagem. Normalmente, a mordedura assume duas formas básicas, as quais são representadas pelas letras A e B da Figura 2.12 (Pinfold & Jubb, 1974b).

A forma de mordedura representada pela letra A ocorre mediante a utilização de velocidades de soldagem acima de um certo limite. No caso do processo PAW, este tipo de mordedura só pode ser eliminado com o aumento da corrente ou com a redução da velocidade de soldagem, sendo o primeiro modo o preferido por permitir manter a produtividade (Pinfold & Jubb, 1974b).

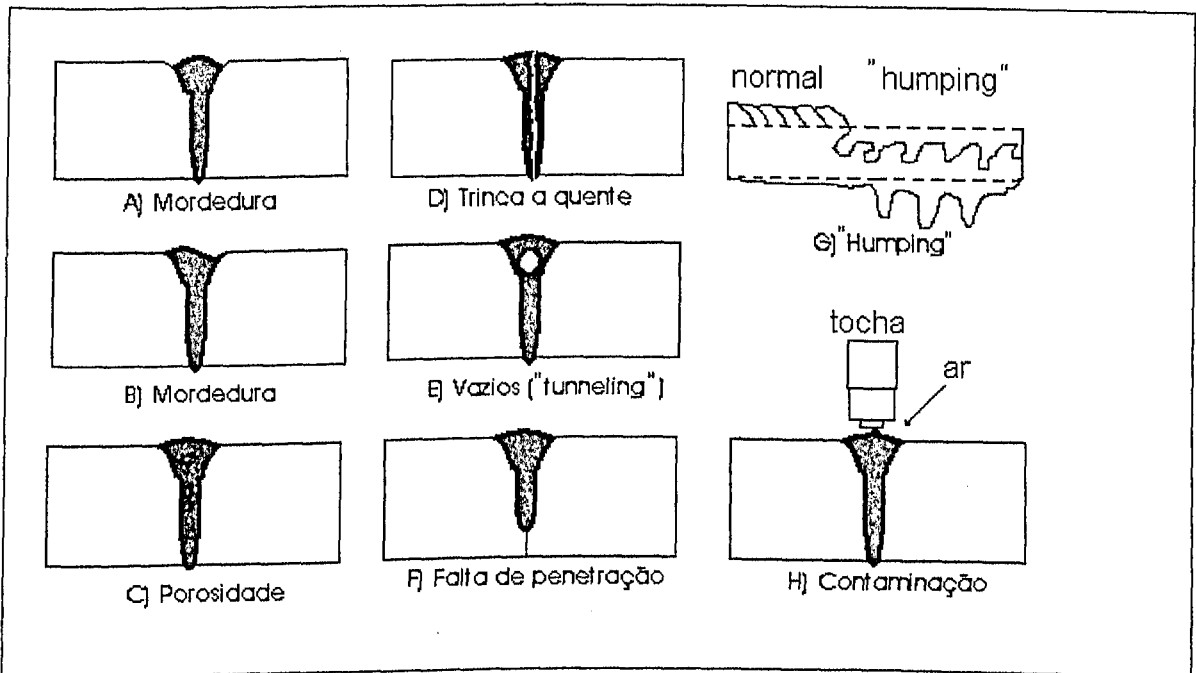


FIGURA 2.12: Defeitos comuns encontrados na soldagem pelo processo PAW (Pinfold & Jubb, 1974b e AWS, 1991a).

A forma de mordedura apresentada na letra B da Figura 2.12 pode ocorrer em qualquer valor de velocidade de soldagem e é mais freqüente em elevados níveis de corrente. Este tipo de defeito pode ser provocado por vários fatores. Por exemplo, o desalinhamento da tocha em relação à superfície da peça e a descentralização do eletrodo em relação ao orifício constritor da ordem de $\pm 1^\circ$ aumentam muito as chances da solda apresentar este tipo de mordedura. Também a soldagem com bocais de múltiplos orifícios pode produzir cordões com este tipo de mordedura se os orifícios não estiverem orientados adequadamente em relação à direção de soldagem. Mordeduras também podem ser resultados da utilização de juntas que apresentam um desnível que excede 5 % da espessura da chapa, ou ainda, do desbalanceamento do retorno do cabo terra. Nestes casos, a utilização de metal de adição

pode minimizar ou eliminar os problemas de mordedura (Pinfold & Jubb, 1974b e Torres et al., 1992).

Outro fator que atua para a formação de mordeduras no cordão de solda é a utilização de gases de baixa pureza. Elementos contaminantes tais como nitrogênio, hidrogênio, metano e oxigênio podem alterar o gradiente de tensão superficial da poça de fusão e propiciar o aparecimento de mordeduras (Hou et al., 1996 e Pang et al., 1994).

b) Porosidade

Porosidade é o tipo de defeito apresentado na letra C da Figura 2.12 e é caracterizada pelo aparecimento de pequenos vazios que se distribuem no interior ou na superfície dos cordões de solda. Estes vazios são provenientes de bolhas que se formam no interior do metal líquido e que são aprisionadas pela frente de solidificação. A formação de bolhas na poça de fusão esta relacionada com a absorção de gases pelo metal líquido. Gases como o oxigênio e o hidrogênio apresentam elevada solubilidade no metal líquido e, após serem absorvidos, podem reagir com outros componentes deste, resultando em um novo produto que pode ser um outro gás. A evolução do componente gasoso na poça de fusão pode gerar porosidade se este não conseguir escapar antes de ser aprisionado pela frente de solidificação (Modenesi, 1985).

Os gases que podem ser absorvidos pela poça de fusão podem ser provenientes da atmosfera, de contaminantes nos gases de proteção e de plasma e da queima de resíduos na junta devido a um inadequado procedimento de limpeza. Nestes casos, a solução para o problema de porosidade seria respectivamente o aumento do débito de gás de proteção, a utilização de gases de plasma e de proteção de maior pureza e a adoção de um adequado procedimento de limpeza para a soldagem (Torres et al., 1992).

Uma outra solução para o problema de porosidade na solda seria a utilização de um metal de adição que contenha elementos desoxidantes em sua composição química. A ação dos elementos desoxidantes é de reagir com o oxigênio presente na solda, formando óxidos e eliminando o oxigênio da poça de fusão. Como exemplos de elementos que possuem ação desoxidante, pode-se citar o manganês e o silício, utilizados na soldagem dos aços e ligas de cobre, o fósforo, para a soldagem do cobre e o alumínio e o titânio, para a soldagem das ligas de cobre e de níquel (Pinfold & Jubb, 1974b e Modenesi, 1985).

c) Trinca a quente

Os problemas de trincas a quente são muito dependentes das características de solidificação do material a ser soldado. Estas trincas estão relacionadas com a formação de filmes líquidos nos contornos de grãos devido à segregação de impurezas de baixos pontos de fusão. A ação de tensões de tração durante o resfriamento do cordão de solda promove a abertura de trincas, pois como os grãos estão separados entre si por filmes líquidos, o material não suporta o nível de deformação imposto sem se romper (Modenesi, 1985 e Weymueller, 1978).

Este tipo de problema está representado pela letra D da Figura 2.12. Devido à alta razão de aspecto da solda (razão entre penetração e largura da solda), à forma alongada da poça de fusão e ao grau de restrição da junta, o problema de trinca a quente pode ser agravado pelo processo de soldagem por plasma. Algumas medidas práticas podem ser adotadas para minimizar a possibilidade de formação da trinca a quente. Medidas tais como a redução do grau de restrição da junta, a preparação correta da junta de modo a evitar desalinhamentos e uma adequada limpeza da junta, são medidas que devem ser empregadas para reduzir as chances de aparecimento de trincas na solda (Pinfold & Jubb, 1974b e Modenesi, 1985).

d) vazios (“tunneling”)

Em certas operações de soldagem, grandes vazios são formados no interior do cordão de solda como mostra esquematicamente a letra E da Figura 2.12. O processo de soldagem por plasma é um processo muito propenso à formação destes tipos de vazios no interior da solda.

A causa mais comum da formação destes vazios é a utilização de um nível de corrente insuficiente em relação aos demais ajustes de parâmetros, tais como tipo e espessura do material de base, vazão de gás de plasma e velocidade de soldagem. Este tipo de defeito também ocorre quando, devido a um ajuste inadequado dos parâmetros de soldagem, o “keyhole” não se forma completamente. Neste caso, os gases provenientes do arco podem ser aprisionados pela frente de solidificação, formando os vazios no interior do cordão de solda (Pinfold & Jubb, 1974b).

Segundo Paula Jr (1997), o aumento excessivo da distância tocha-peça resulta em um arco ligeiramente cônico, o que diminui o efeito de concentração de energia e a penetração do

arco. Por outro lado, o jato de plasma tende a se tornar turbulento em função do aumento da diferença de pressão entre as partes superior e inferior do arco. Isto forneceria condições apropriadas para o aprisionamento de gases pela frente de solidificação e a formação dos vazios no interior da solda.

e) Falta de penetração

A falta de penetração ocorre quando a poça de fusão não consegue atingir a profundidade desejada no material de base. Este problema é mostrado na letra F da Figura 2.12. A principal causa deste defeito é o ajuste inadequado dos parâmetros de soldagem, principalmente os que determinam o poder de penetração do arco. No modo “keyhole” de soldagem, falta de penetração significa a não formação do “keyhole”. Contaminantes provenientes dos gases utilizados no processo de soldagem também podem causar instabilidade na poça de fusão e acarretar situações de penetração incompleta (Torres et al., 1992)

A solução para este problema é o ajuste dos parâmetros de soldagem no sentido de se aumentar o fornecimento de energia para a solda. Dentro deste aspecto, aumentos na corrente, vazão do gás de plasma e no recuo do eletrodo, ou ainda, a redução da velocidade de soldagem podem eliminar este problema. Na impossibilidade do ajuste destes parâmetros, a solução seria a troca dos gases de plasma e de proteção por gases com maior condutividade térmica. A utilização de gases de elevada pureza também ajudam a reduzir os problemas de falta de penetração.

f) “Humping”

O “humping” é um defeito grosseiro no cordão de solda e é caracterizado por mudanças abruptas na geometria do cordão na forma de protuberâncias separadas por intervalos de relativa uniformidade. Este tipo de defeito é representado pela seção longitudinal mostrada na letra G da Figura 2.12. Nesta figura, é mostrada uma comparação entre um cordão de solda normal (lado esquerdo) e um com o defeito “humping” (lado direito) (Garcia & Norrish, 1995).

Este tipo de defeito está relacionado com excessivos fluxos de gás ou a elevados níveis de aporte de calor, no caso, corrente de soldagem. Nestas condições, o “keyhole” torna-

se grande o suficiente para deslocar a poça de fusão no sentido contrário à direção de soldagem, formando as protuberâncias características do defeito “humping”. A partir do aparecimento do “humping”, aumentos na vazão do gás de plasma ou na corrente de soldagem podem acarretar o corte da junta (Garcia & Norrish, 1995).

A solução para o problema do “humping” recai sobre o ajuste dos parâmetros de soldagem. A redução da vazão do gás de plasma, da corrente de soldagem ou de ambos pode restaurar a estabilidade do “keyhole” e solucionar o problema do aparecimento deste defeito.

g) Contaminação

A contaminação da solda pode ocorrer por dois motivos, os quais podem ser vistos na letra H da Figura 2.12. A contaminação pode ocorrer devido a uma insuficiente vazão do gás de proteção, que permite o acesso do ar atmosférico ao cordão de solda. Este tipo de contaminação pode ser identificado por intensa descoloração do cordão de solda ou da ZAC adjacente. A contaminação da solda pode se dar também como resultado do contato da poça de fusão com o material do bocal constritor, que é feito normalmente de cobre. Neste caso, o cordão de solda terá as suas propriedades mecânicas comprometidas pela fragilização em virtude da sua contaminação pelo cobre (AWS, 1991a).

A contaminação da solda pelo ar atmosférico é superficial e pode ser eliminada através do aumento do débito do gás de proteção ou pela utilização de um gás mais denso como gás de proteção. A contaminação da solda pelo material do bocal constritor é eliminada com o aumento da distância tocha-peça (AWS, 1991a).

3- PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1- Introdução

O procedimento experimental é um conjunto de técnicas propostas para dar uma seqüência lógica às ações de busca de um determinado tipo de resposta, ou seja, visa conduzir a pesquisa científica. No desenvolvimento de uma pesquisa científica, a padronização dos ensaios é de fundamental importância para garantir a validade dos resultados obtidos, porque garante que estes serão realizados através da mesma metodologia, com os mesmos materiais e equipamentos, todos estes definidos por um procedimento experimental (Cervo & Bervian, 1972).

Através deste capítulo, procura-se descrever todos os equipamentos que fizeram parte da bancada experimental, os materiais e consumíveis empregados nos ensaios, além dos procedimentos de soldagem. Para tanto, este capítulo foi dividido em três itens. No primeiro item, será feita uma abordagem descritiva dos equipamentos que foram empregados na realização dos testes. No segundo item, serão apresentados todos os materiais e consumíveis que foram utilizados na execução das soldas e, no terceiro item, serão apresentadas as técnicas de soldagem e os critérios para a análise dos cordões de solda empregados para a condução do estudo proposto por este trabalho.

3.2- Equipamentos de soldagem

Equipamentos de soldagem são todos os dispositivos que constituem o sistema de soldagem e que atuam diretamente sobre a execução do cordão de solda. O conjunto de equipamentos dos quais o sistema de soldagem foi composto é mostrado de forma esquemática na Figura 3.1. Nesta figura pode ser visto também os dispositivos de controle de vazão de gás de plasma e de proteção e o sistema de aquisição de dados, que é composto por um computador conectado à fonte de energia.

A seguir, será feita uma abordagem detalhada de cada um dos equipamentos do sistema de soldagem e dos dispositivos auxiliares que foram utilizados para o desenvolvimento deste trabalho.

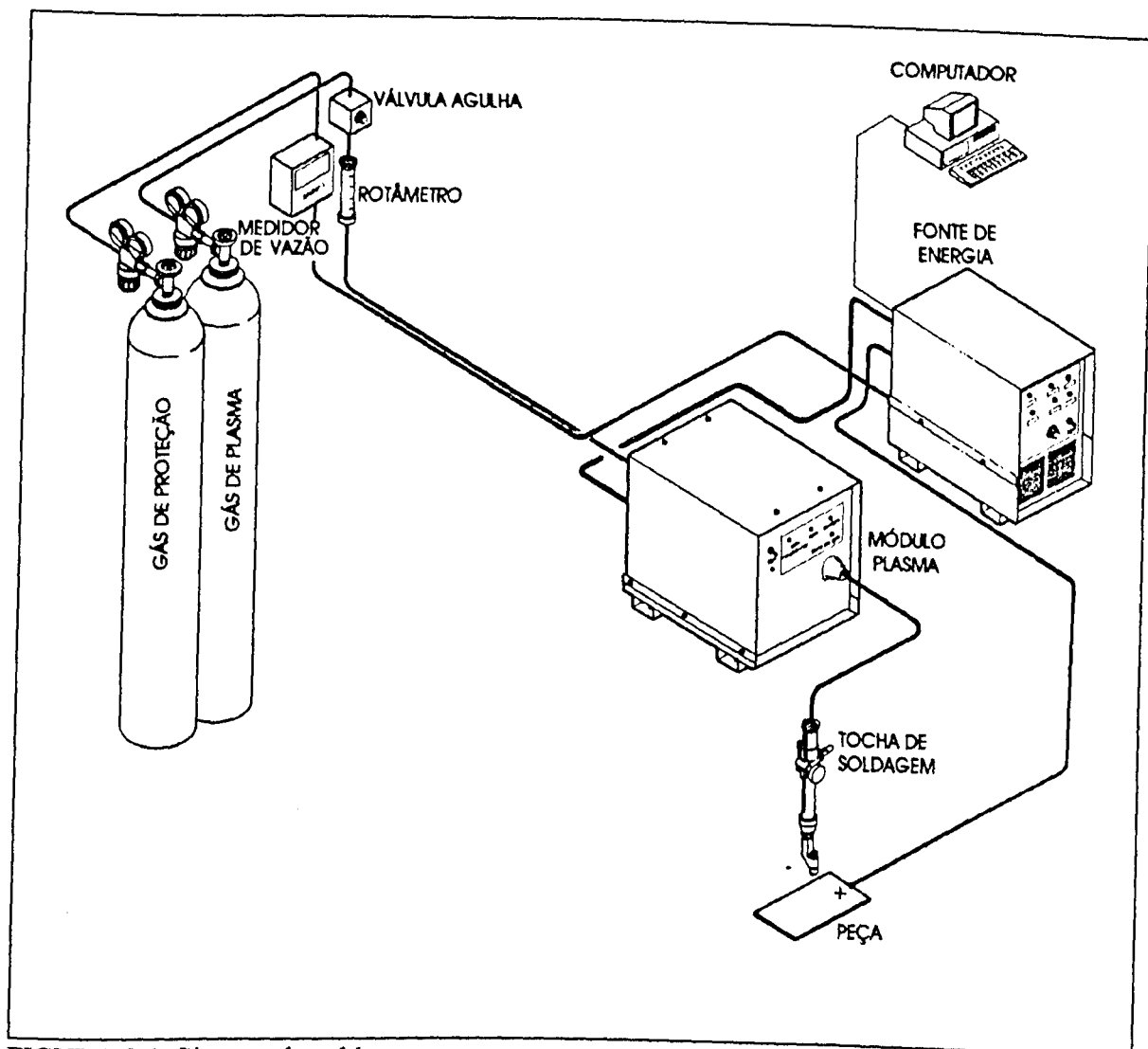


FIGURA 3.1: Sistema de soldagem.

3.2.1- Fonte de soldagem

A fonte de soldagem utilizada foi uma multiprocesso designada por INVERSAL 300, desenvolvida e fabricada pelo IMC/UFSC (Instituto de Mecatrônica da Universidade Federal de Santa Catarina). É uma fonte eletrônica (transistorizada) que abrange aplicações de soldagem através dos processos SMAW, GMAW, GTAW e PAW.

Esta fonte trabalha com uma corrente nominal de 300 A para um fator de serviço igual a 100%, sendo que a capacidade de corrente fornecida é da ordem de 450 A. As principais características desta fonte estão abaixo relacionadas:

- Tensão em vazio: 56 V
- Tipo de corrente: contínua ou alternada (constante ou pulsada)
- Corrente nominal: 300 A
- Corrente máxima: 450 A
- Potência máxima consumida: 12 KW
- fator de potência: 0,94

3.2.2- Módulo plasma

O módulo plasma é a fonte do arco piloto, cuja finalidade é a de facilitar a abertura do arco do processo plasma. A utilização do módulo plasma no processo PAW se faz necessária, porque, sendo o eletrodo recuado no interior da tocha de soldagem, a abertura do arco pelo método curto circuito fica inviabilizada. Este sistema é composto por um circuito que gera alta tensão em alta frequência, ionizando o gás presente na região entre a ponta do eletrodo e o bocal de constrição, de modo que um arco de baixa intensidade é estabelecido entre estas partes (arco piloto). Desta forma, quando a fonte de energia é acionada, já existe um caminho preferencial de gás ionizado e condutor de eletricidade, facilitando a abertura do arco plasma entre o eletrodo e a peça a ser soldada.

O módulo plasma utilizado para a abertura do arco piloto foi desenvolvido no IMC/UFSC. Este equipamento corresponde a um ignitor de alta frequência, sendo que a corrente de partida fornecida para a abertura do arco piloto é de 7 A. O módulo plasma é conectado à fonte de soldagem de forma similar ao cabeçote de alimentação utilizado no processo GMAW.

3.2.3- Medidores de vazão de gás

Durante a soldagem dos corpos de prova, foram controladas as vazões dos gases de proteção e de plasma. O controle da vazão do gás de plasma deve ser feito com um instrumento de maior precisão, uma vez que pequenas variações podem desestabilizar a condição do "keyhole". A vazão do gás de plasma foi controlada através de um dispositivo do tipo rotâmetro, com capacidade de 0,30 a 3,7 l/min.. Este rotâmetro foi calibrado no

IMC/UFSC através de um outro rotâmetro previamente calibrado. A Figura 3.2 mostra a curva de calibração do rotâmetro utilizado na medição da vazão do gás de plasma.

Na soldagem, a regulação da vazão do gás de plasma foi feita através de uma válvula do tipo agulha para conferir maior estabilidade ao fluxo de gás. O valor correspondente da vazão deste gás foi obtido diretamente através da leitura feita no rotâmetro. A Figura 3.3 mostra o esquema de regulação e medição da vazão do gás de plasma.

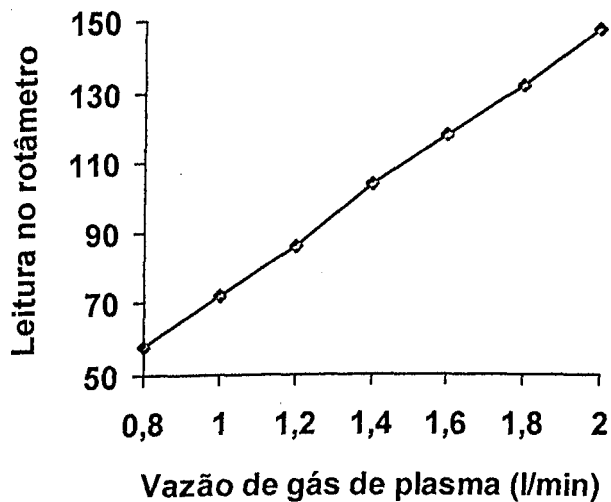


FIGURA 3.2: Curva de calibração do rotâmetro utilizado para a medição da vazão do gás de plasma.

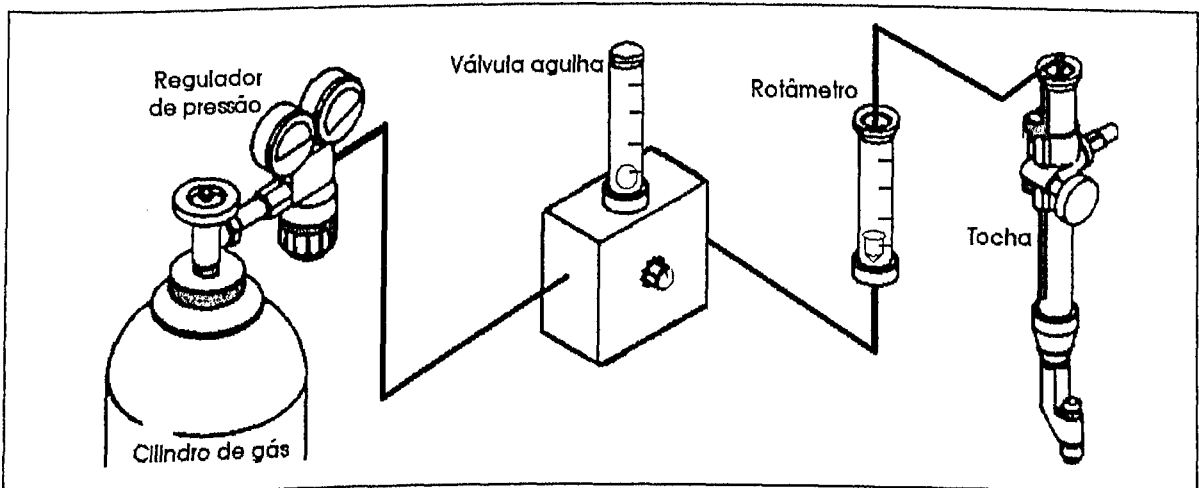


FIGURA 3.3: Dispositivos de regulação e medição da vazão do gás de plasma.

A vazão do gás de proteção foi controlada através da leitura do medidor de vazão digital MVG-1, desenvolvido pelo IMC/UFSC. A capacidade de vazão deste medidor situa-se entre 2,0 e 18 l/min.. O controle do fluxo de gás foi feito diretamente através do regulador de pressão do cilindro de gás.

3.2.4- Tocha de soldagem

A tocha utilizada para a soldagem foi a PWM-300 da Thermal Dynamics Corporation. Esta tocha foi projetada para soldagem por plasma na polaridade direta com arco transferido. Nestas condições, a capacidade de corrente da tocha é de 300 A. Esta tocha pode ser equipada com bocais de constrição com orifícios de 3,2 mm (0,125”), 2,8 mm (0,113”) e 2,4 mm (0,093”) de diâmetro, para serem utilizados em aplicações de até 300, 250 e 200 ampères, respectivamente. A Figura 3.4 mostra a tocha de soldagem PWM-300 de forma explodida, ou seja, deixando a mostra todas as peças que a compõem.

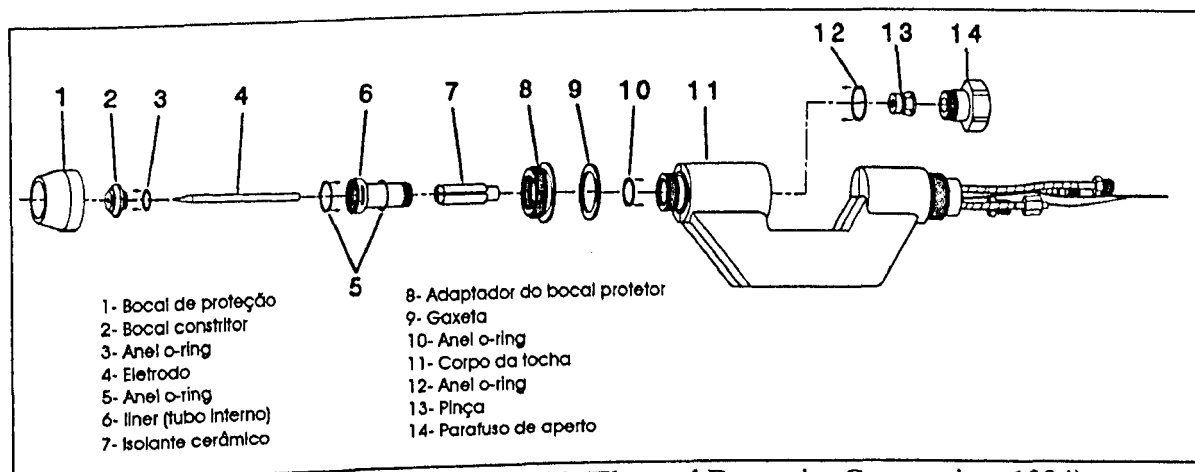


FIGURA 3.4: Tocha de soldagem PWM-300 (Thermal Dynamics Corporation, 1994).

A tocha de soldagem permite o ajuste da posição do eletrodo em relação ao bocal de constrição. Este parâmetro, juntamente com o diâmetro do orifício constritor, define o grau de constrição do arco. Este ajuste deve ficar entre os valores máximo e mínimo estabelecido pelo fabricante, sendo definido em função do grau de constrição desejado para uma determinada aplicação. No caso da tocha PWM-300, os valores máximo e mínimo para o recuo do eletrodo são 2,36 mm (0,093”) e 0,80 mm (0,032”), respectivamente.

Se o recuo do eletrodo for excessivo, a abertura do arco piloto se torna difícil devido à grande distância entre a ponta do eletrodo e o bocal de restrição, exigindo uma maior corrente de partida para o arco piloto. Se for menor que o valor mínimo, dependendo do ângulo de ponta do eletrodo, o eletrodo pode obstruir a passagem de gás pelo orifício restritor ou tocar o bocal de restrição, criando condições para a ocorrência do fenômeno arco duplo, o que danificaria a tocha de soldagem.

3.2.5- Sistema de movimentação da tocha

Todos os ensaios foram realizados de forma automatizada. O movimento de translação da tocha de soldagem foi executado por um carrinho, que é mostrado na Figura 3.5. Um conjunto moto-reductor aciona o fuso, perfazendo a movimentação da tocha de soldagem. Um dispositivo eletrônico produzido pelo IMC/UFSC permite o controle da direção do movimento e da velocidade do fuso e, portanto, da direção e da velocidade de soldagem. A máxima velocidade de soldagem fornecida pelo sistema é de 80 cm/min.

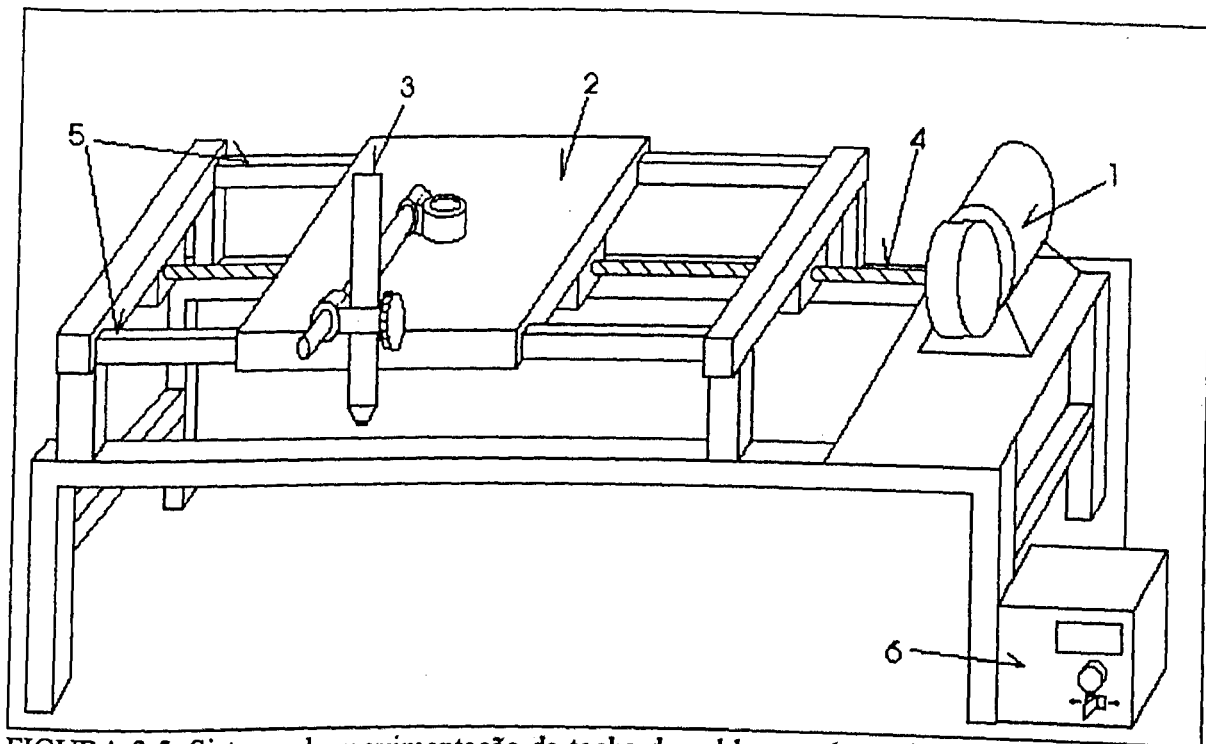


FIGURA 3.5: Sistema de movimentação da tocha de soldagem: 1- conjunto moto-reductor; 2- plataforma; 3- tocha de soldagem; 4- fuso; 5- guias da plataforma; 6- dispositivo eletrônico de controle de direção e velocidade de soldagem.

3.2.6- Sistema de aquisição e tratamento de dados

O sistema de aquisição e tratamento de dados é composto por um computador, equipado com uma placa de aquisição de sinais de tensão e corrente e um programa específico para o controle destas funções, que é conectado à fonte de soldagem. Tanto a placa como o programa foram desenvolvidos no IMC/UFSC.

O programa utilizado permite configurar os períodos e frequências de leitura dos sinais de tensão e corrente de soldagem. Os dados referentes à operação de soldagem são fornecidos na forma de histogramas e gráficos, permitindo a análise do comportamento do processo.

3.2.7- Sistema de aquisição e tratamento de imagens

Este sistema foi utilizado para a medição de características geométricas dos cordões de solda, tais como a penetração e o reforço da raiz da solda. O sistema é composto por um computador equipado com uma placa de aquisição e dois “softwares” para controlar as funções de aquisição e tratamento de imagens. A placa de aquisição foi conectada a uma câmera de vídeo, através da qual foram obtidas as imagens.

A câmera utilizada para a geração das imagens foi a CCD Hitachi KP-110. Esta câmera foi fixada verticalmente em um suporte projetado de tal maneira a permitir o ajuste de posicionamento desta em relação à peça a ser analisada. Através da combinação de lentes da câmera, aumentos de até 20 vezes podem ser obtidos. Para a aquisição das imagens, foi utilizada a placa Vision-EZDT-55. Os “softwares” utilizados para controlar a aquisição e o tratamento das imagens foram o GLOBAL LAB ACQUIRE-GLA e o GLOBAL LAB IMAGE-GLI respectivamente.

3.2.8- Instrumentos de medição geométrica

Durante a execução deste trabalho, foram utilizados um paquímetro com resolução de 0,05 mm e um microscópio ferramenteiro com mesa de coordenadas com resolução de movimento em X e Y de 0,001 mm. O paquímetro foi utilizado para o ajuste do recuo do eletrodo em relação ao bocal de constrição na tocha de soldagem. O microscópio ferramenteiro foi utilizado nas medições da face da raiz (nariz) da junta.

3.3- Materiais

Os materiais empregados neste trabalho foram as chapas para os corpos de prova e os consumíveis utilizados durante a soldagem (gases e eletrodo).

3.3.1- Corpos de prova

Os corpos de prova foram confeccionados a partir de chapas de aço carbono comum (aço ABNT 1020) com 12,7 mm ($\frac{1}{2}$ ") de espessura. Este material foi selecionado devido a sua grande aplicação em diversos segmentos industriais, que se beneficiariam com a divulgação e o entendimento de um processo de soldagem (PAW) considerado de alta produtividade.

As chapas foram usinadas e preparadas com uma configuração em V. O nariz (face da raiz) da junta também foi usinado para assegurar o correto encaixe das partes (folga nula). A Figura 3.6 mostra a configuração dos corpos de prova utilizados. A dimensão da face da raiz da junta (h) foi variada durante a realização dos testes para a determinação das melhores condições de soldagem.

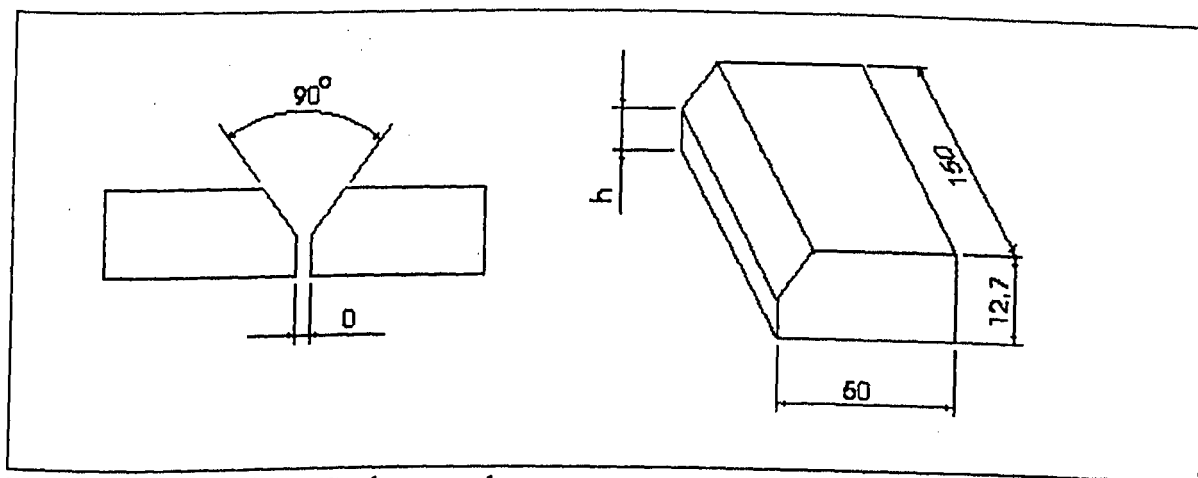


FIGURA 3.6: Configuração do corpo de prova.

3.3.2- Gases

Uma particularidade do processo PAW é a utilização de duas fontes de gás, uma para o arco (gás de plasma) e outra para a proteção da solda (gás de proteção). O gás de plasma utilizado na maioria dos ensaios foi o argônio puro. O argônio foi selecionado por ser indicado para a maioria das aplicações com o processo PAW e em função de sua neutralidade em relação ao material do eletrodo. Uma mistura de argônio com 5% de hélio também foi utilizada em alguns testes para verificar qual a influência do tipo de gás de plasma sobre o cordão de solda.

Para a proteção da poça de fusão foram utilizados oito tipos de gases: o argônio puro, o CO₂ puro e misturas de argônio com 25% de CO₂, 18% de CO₂, 10% de CO₂, 5% de oxigênio, 5% de hélio e 25% de hélio. Ao contrário do gás de plasma, o gás de proteção não entra em contato com o eletrodo, de modo que não existe nenhuma exigência quanto ao seu potencial de oxidação. O único ponto a ser analisado no uso de um determinado gás de proteção é a sua ação sobre a poça de fusão, levando em consideração uma possível deterioração das características da solda (AWS, 1991a).

3.3.3- Eletrodo

Foi utilizado um eletrodo de tungstênio com a adição de 2% de óxido de tório (EWTh-2) com diâmetro de 4,8 mm. O ângulo de ponta do eletrodo foi mantido em 60°.

Devido à complexidade das operações de troca e afiação do eletrodo, há a necessidade de minimizar o seu desgaste. Isto explica o fato dos eletrodos utilizados em aplicações com o processo PAW possuírem grandes diâmetros. O aumento do diâmetro do eletrodo reduz a sua resistência elétrica, promovendo um menor aquecimento por efeito joule e um menor desgaste de sua ponta (Campbell & Lacoursiere, 1995).

A utilização de um ângulo de ponta de 60° foi proposto por manter a facilidade de acendimento do arco piloto e reduzir o desgaste da ponta do eletrodo em relação a ângulos menores. Segundo Paula Jr (1997), o aumento do ângulo de ponta do eletrodo conduz a uma condição em que o ponto preferencial para a abertura do arco piloto é substituído por pontos da sua lateral. Isto acarreta, em algumas situações, dificuldade para a abertura do arco piloto pelo fato da lateral do eletrodo possuir vários pontos preferenciais (igualmente distantes do bocal constritor), o que torna difícil a criação de um único ponto de emissão de elétrons e a geração do diferencial de tensão necessário para essa operação.

3.4- Procedimento experimental

3.4.1- Procedimento de soldagem

- Preparação dos corpos de prova: Os corpos de prova foram limpos com acetona para eliminar possíveis resíduos de fluido de corte. As chapas foram ponteadas em cada uma das extremidades para formar o tipo de junta apresentado na Figura 3.6. Foram confeccionados corpos de prova com faces de raiz (nariz) de 5 e 6 mm.
- Regulagem da tocha de soldagem: Esta regulagem consistiu no ajuste do recuo do eletrodo e no ajuste de posicionamento da tocha em relação ao corpo de prova. O ajuste do recuo do eletrodo foi feito introduzindo-se a haste de um paquímetro no orifício do bocal de constrição para, em seguida, proceder o aperto do eletrodo na posição desejada. O valor ajustado para o recuo do eletrodo foi de 2,35 mm. O posicionamento da tocha em relação ao corpo de prova foi feito colocando-se este sobre o suporte (Figura 3.7) e, através de um esquadro, a tocha foi alinhada verticalmente a 90° com o corpo de prova.
- Posicionamento do corpo de prova: O corpo de prova foi alinhado de tal modo que o movimento da tocha percorresse toda a extensão da linha central da junta. Como o movimento da tocha é fixo, o alinhamento foi feito atuando-se sobre o corpo de prova. A Figura 3.7 mostra a forma como foi feito o alinhamento do corpo de prova em relação à direção de movimento da tocha.

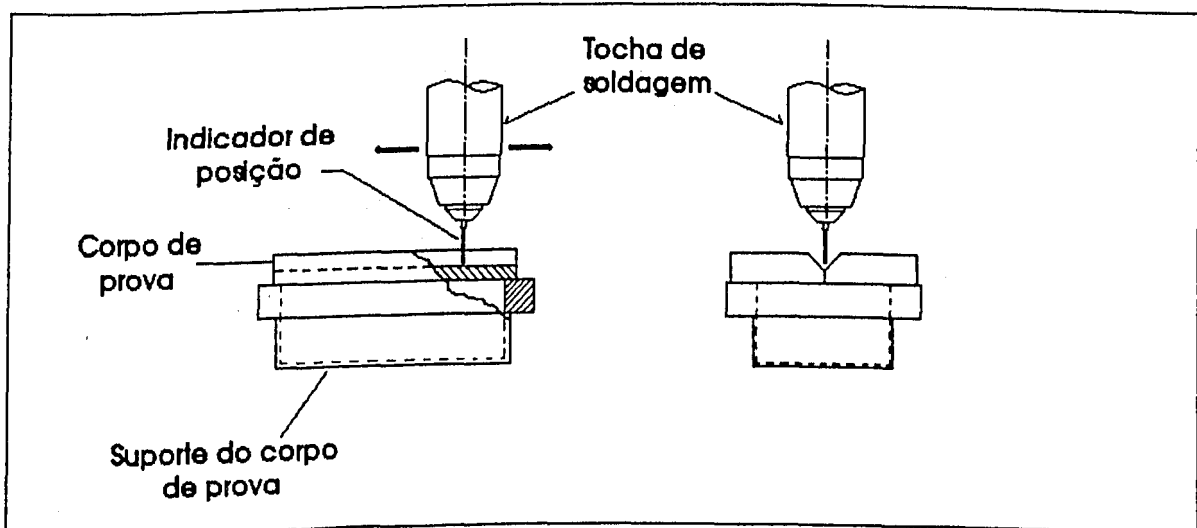


FIGURA 3.7: Alinhamento do corpo de prova em relação à direção de movimento da tocha.

- Ajuste da distância tocha-peça: A distância tocha-peça foi ajustada com auxílio de um padrão, sendo o valor medido de 6,0 mm a partir da face da junta, isto é, do vértice formado pela junta até a face da tocha. Este posicionamento foi feito através de uma cremalheira no sistema de fixação da tocha.
- Preparação para a solda: Neste estágio todos os parâmetros de soldagem pré estabelecidos foram ajustados. Na regulagem da vazão do gás de plasma, primeiro foi fornecido um fluxo de gás para a abertura do arco piloto para depois, através de uma válvula agulha e da leitura do rotâmetro, proceder o ajuste para os valores desejados.
- Realização das soldas: Todas as soldas foram realizadas de forma automatizada e na posição plana. Para dar início à soldagem, o arco principal era aberto em uma das extremidades do corpo de prova, seguido do acionamento do movimento da tocha. O acionamento da movimentação da tocha foi retardado por alguns segundos, até que o arco conseguisse atravessar a espessura da face de raiz. Este procedimento visava facilitar a formação do orifício do “keyhole” a partir do início da solda.
- Aquisição de dados: Durante a soldagem, os sinais de tensão e corrente foram adquiridos e posteriormente analisados.

3.4.2- Planejamento do experimento

A técnica utilizada para o planejamento do experimento foi o planejamento fatorial completo (“fatorial design”). Este método abrange todas as combinações possíveis dos parâmetros de soldagem a serem variados em função de seus níveis, permitindo um mapeamento da região analisada. Os níveis de cada um dos fatores (variáveis de soldagem) foram determinados a partir dos limites extremos (máximos e mínimos) destes, levantados através dos testes preliminares.

Os parâmetros de soldagem analisados (entradas) foram a velocidade de soldagem, corrente e a vazão de gás de plasma e a resposta (saída) foi o aspecto do cordão de solda, que está relacionado a manutenção do “keyhole” durante a soldagem. Esta análise tem como objetivo encontrar uma faixa útil de trabalho para a aplicação do processo de soldagem por plasma na execução do passe de raiz de uma junta chanfrada.

3.4.3- Análise geométrica das amostras

Os corpos de prova foram seccionados no sentido transversal do cordão de solda e submetidos a uma preparação metalográfica. O ataque químico foi feito com Nital a 10%. A Figura 3.8 mostra o critério utilizado para a identificação das características dos cordões de solda. Este critério é baseado nas medidas do reforço da raiz da solda.

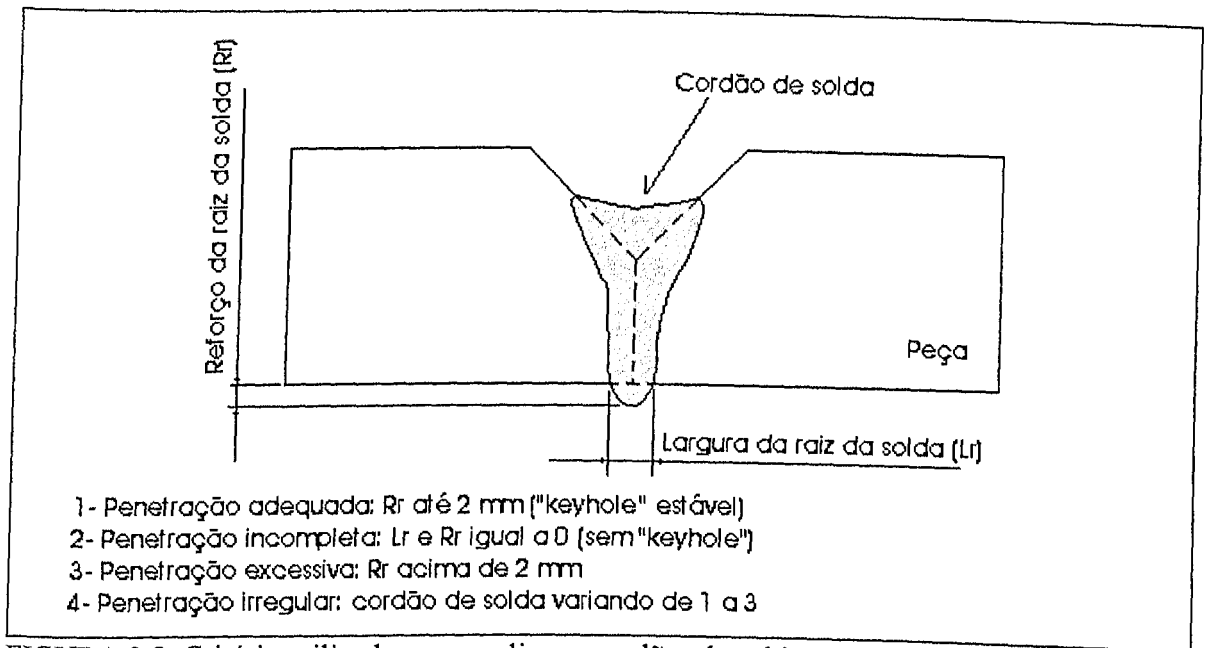


FIGURA 3.8: Critério utilizado para avaliar os cordões de solda (Hoffmeister et al., 1996)

A medição do reforço da raiz da solda foi feita com o sistema de aquisição e tratamento de imagens. As imagens das amostras foram transformadas em arquivos gráficos e armazenados na memória do computador. Uma imagem obtida a partir de um papel milimetrado permitiu a calibração do sistema de tratamento de imagens.

4- TESTES PRELIMINARES

4.1- Introdução

Esta etapa foi encarada como um período caracterizado pela busca da prática operacional dos equipamentos de soldagem e do próprio entendimento do processo. Como se trata de um processo recentemente introduzido na área industrial, a falta de informações técnicas é o maior obstáculo para o desenvolvimento do contato prático com este processo de soldagem.

Além do contato inicial com o processo, os testes preliminares tiveram como objetivo fornecer subsídios para a determinação de uma faixa de parâmetros em que o “keyhole” é estável, ou seja, um cordão de solda com aspecto regular e penetração adequada. Os resultados permitiriam determinar a região dos parâmetros de soldagem em que é possível aplicar o planejamento experimental para a determinação do envelope operacional aplicado à soldagem do passe de raiz. Esta etapa foi iniciada a partir de uma condição obtida da literatura, descrita a seguir.

4.2- Condição inicial de teste

A condição inicial de teste é o ponto de referência para a determinação de uma faixa operacional onde se consegue obter um cordão de solda com características desejadas, ou seja, a soldagem do passe de raiz com “keyhole”. A literatura relacionada ao processo PAW foi a principal fonte de informações na determinação da condição de soldagem inicial. A primeira condição para o passe de raiz (técnica “keyhole”) da junta especificada na Figura 3.6 do capítulo 3, com $h = 6,0$ mm, foi baseada no trabalho de Paula Jr (1997). Esta condição é apresentada a seguir:

Corrente - 245 A

Vazão de gás de plasma - 1,6 l/min.

Vazão de gás de proteção - 8 l/min.

Recuo do eletrodo - 2,35 mm

Gás de plasma - Argônio

Gás de proteção - Argônio

Diâmetro do bocal - 3,2 mm

Velocidade de soldagem - 14 cm/min.

Com esta condição de soldagem foram realizados 4 testes e nenhum deles forneceu condições para a manutenção do “keyhole”. Foi observado que, ao se iniciar a soldagem, a poça de fusão entrava em colapso e o corpo de prova era literalmente cortado pela força do arco. Os resultados mostraram que a combinação utilizada entre corrente, velocidade de soldagem e vazão de gás de plasma não era adequada para a soldagem da junta em questão.

O corte da junta ocorreu em função dos efeitos de excessivos aporte de calor e vazão de gás de plasma. A combinação entre estes dois efeitos pode resultar no desenvolvimento de forças que superam a força de tensão superficial que atua no sentido de manter a poça de fusão na junta. O desequilíbrio gerado nas forças que atuam na poça de fusão vai determinar a expulsão do metal líquido por baixo da junta, causando o corte do corpo de prova (Martikainen & Moisio, 1993 e Pinfold & Jubb, 1973b).

Verificou-se a necessidade de um melhor ajuste dos parâmetros que definem a condição de soldagem, ou seja, a redução do aporte de calor e da intensidade do arco. Este ajuste visou estabilizar as condições de manutenção do “keyhole” durante a soldagem, podendo ser obtido através da redução dos níveis de corrente e/ou vazão do gás de plasma e/ou o aumento da velocidade de soldagem.

4.3- Ajuste da condição inicial de teste

O ajuste da condição inicial de soldagem, no sentido de permitir a obtenção e a manutenção do “keyhole”, foi feito alterando-se a velocidade de soldagem de 14 para 17 cm/min. e variando-se a vazão de gás de plasma de 1,4 a 1,8 l/min. em intervalos de 0,1 l/min.. O aumento da velocidade de soldagem visou reduzir o aporte de calor, evitando o colapso da poça de fusão e conseqüentemente o corte do corpo de prova. A variação da vazão do gás de plasma foi feita com o intuito de obter uma intensidade de arco (pressão do arco) que, para esta situação, garantisse a manutenção do “keyhole”, ou seja, que garantisse uma penetração total na junta sem a expulsão do metal fundido da poça de fusão. Os demais parâmetros de soldagem da condição descrita no item 4.2 não sofreram modificações.

Os resultados dos testes são apresentados na Tabela 4.1. Em cada um dos ensaios, retardou-se o acionamento do movimento da tocha por alguns segundos após a abertura do arco, até a formação do “keyhole”.

TABELA 4.1: Resultados dos testes realizados a partir do ajuste da condição inicial.

Teste	Vazão de gás de plasma (L/min)	Resultado
1	1,4	Penetração incompleta
2	1,5	Penetração incompleta
3	1,6	Penetração incompleta
4	1,7	Penetração excessiva
5	1,8	Penetração excessiva

Onde: Velocidade de soldagem: 17 cm/min..

Nos testes em que se variou a vazão do gás de plasma de 1,4 a 1,6 l/min. (testes 1 a 3 da Tabela 4.1), não houve penetração total na junta e o aspecto superficial do cordão de solda permaneceu ruim, com buracos não preenchidos pelo metal fundido. Esta irregularidade no cordão de solda foi causada provavelmente pela redução do aporte de calor e da vazão do gás de plasma em relação à condição inicial extraída da literatura, insuficientes para manter o “keyhole” nestas condições.

Os testes realizados com vazão de gás de plasma acima de 1,6 l/min. (testes 5 e 6 da Tabela 4.1) geraram penetração excessiva, com os cordões de solda caracterizados pela ocorrência do defeito “humping”. Segundo Garcia & Norrish (1995), este defeito ocorre em situações de elevados aporte de calor e/ou vazão de gás de plasma, sendo uma condição próxima ao corte da junta. Nestas condições, a poça de fusão não consegue se sustentar, formando as protuberâncias características deste defeito. A Figura 4.1 mostra este tipo de defeito na raiz de uma das soldas realizadas.

A obtenção de um “keyhole” estável não foi alcançada com estas condições de soldagem, sendo observado a passagem abrupta entre situações de penetração incompleta e penetração excessiva. Isto demonstra que foram utilizadas condições extremas, ou seja, que não permitem um ajuste para a obtenção e manutenção do “keyhole”.

Outro aspecto verificado nos testes até aqui realizados foi o péssimo acabamento superficial das soldas, provavelmente devido a dois fatores principais. A falta de molhabilidade do metal fundido e a turbulência na poça de fusão devido ao fluxo de gás de plasma.

A falta de molhabilidade do metal fundido pode ser uma conseqüência da utilização de um gás (argônio) considerado de baixa condutividade térmica, resultando em uma poça de fusão com menor aquecimento e, desta forma, apresentando baixa molhabilidade. Nestes casos, é observado um preenchimento irregular da junta pela poça de fusão, caracterizado por

buracos e vazios ao longo do cordão de solda. De fato, experimentos conduzidos por Martikainen & Moisio (1993) mostraram que a utilização do argônio como gás de plasma e de proteção induzia a subida da poça de fusão pelas paredes do chanfro, fazendo com que esta se solidificasse em um dos lados, ocasionando um preenchimento inadequado da junta. Por outro lado, Paula Jr. (1997) obteve bons resultados, utilizando uma condição com argônio puro como gás de plasma e de proteção, na soldagem do passe de raiz em uma junta em V.

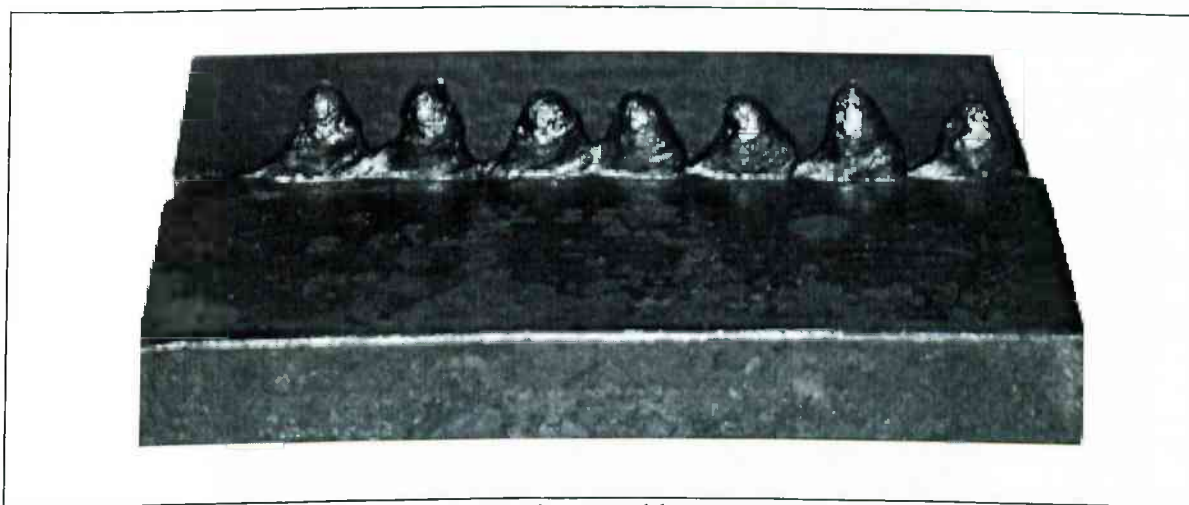


FIGURA 4.1: Defeito “humping” observado em soldas com penetração excessiva.

A turbulência da poça de fusão devido ao fluxo de gás de plasma ocorre principalmente nos casos de falta de penetração. Nesta situação, os gases não têm o orifício do “keyhole” formado para garantir o seu escape, sendo forçados a retornar para a superfície, onde geram intensa turbulência na poça de fusão. Com esta agitação, a poça de fusão é empurrada para trás, no sentido oposto à direção de soldagem, formando irregularidades na superfície da solda. A Figura 4.2 mostra a deterioração do acabamento superficial de uma solda pelo efeito conjunto entre as perturbações na poça de fusão e a falta de molhabilidade do metal fundido.

Para dar prosseguimento ao trabalho, tornou-se necessário sanear os problemas de soldagem e desenvolver condições que efetivamente garantam a obtenção e manutenção do “keyhole”. Desta maneira, foi proposta a substituição do gás de proteção (argônio puro) por um outro que possibilitasse uma melhora no acabamento da solda e uma maior estabilidade para a manutenção do “keyhole”. A utilização de um gás com uma maior condutividade

térmica resultaria no aumento da molhabilidade da poça de fusão e do poder de penetração do arco, podendo melhorar o aspecto superficial das soldas e as condições de obtenção do “keyhole”. Entretanto, esta alteração implicaria em um novo ajuste nos parâmetros de soldagem, uma vez que as características do processo seriam totalmente modificadas.

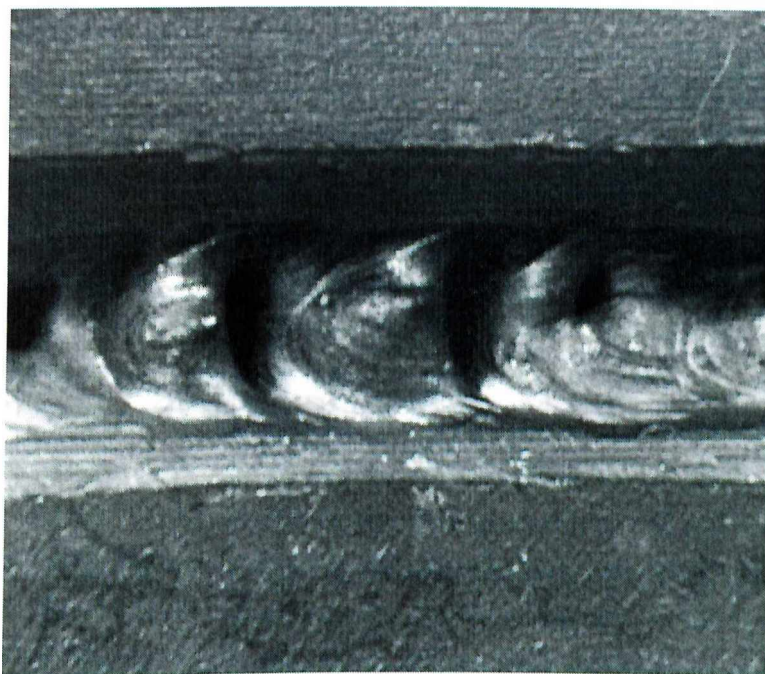


FIGURA 4.2: Acabamento superficial da solda obtido com argônio puro como gás de proteção e de plasma.

4.4- Alteração do gás de proteção e da condição de soldagem

O CO_2 foi a primeira opção avaliada para substituição do argônio como gás de proteção. Após uma série de testes, verificou-se que, apesar do bom acabamento superficial obtido, a alteração efetuada não reduziu a instabilidade do “keyhole”. Outros aspectos observados foram a intensa oxidação do cordão de solda e a formação de uma grande quantidade de escória, mostrando que o CO_2 apresenta um elevado potencial de oxidação. Além dos problemas acima citados, foi verificada a presença de porosidade na superfície das soldas, indicando haver uma excessiva quantidade de oxigênio na atmosfera do arco.

Os resultados obtidos com CO_2 como gás de proteção não foram adequados para possibilitar o prosseguimento do trabalho. Provavelmente, a utilização do processo PAW com uma proteção de CO_2 fica restrita às aplicações com metal de adição, onde os elementos

uma proteção de CO₂ fica restrita às aplicações com metal de adição, onde os elementos desoxidantes introduzidos na poça de fusão podem evitar o aparecimento dos problemas observados. A utilização de um gás de proteção com um menor potencial de oxidação em relação ao CO₂ puro pode resultar em condições favoráveis para esta operação de soldagem, evitando ou minimizando o aparecimento dos problemas relacionados com uma excessiva quantidade de oxigênio na atmosfera do arco.

O gás selecionado para substituir o CO₂ como gás de proteção foi uma mistura de argônio com 25% de CO₂. Esta mistura tem a vantagem de apresentar um menor potencial de oxidação em relação ao CO₂ puro e manter ainda, uma elevada condutividade térmica, garantida pela capacidade de dissociação do CO₂, contido na mistura. Em relação ao argônio puro, esta mistura permitiria uma maior entrega térmica à poça de fusão, melhorando a sua molhabilidade. A elevada condutividade térmica da mistura de argônio com CO₂ criaria condições para um maior resfriamento da parte externa do arco, aumentando o efeito de constrição do arco, resultando no aumento da densidade de energia e do poder de penetração do arco (Hunt et al., 1997; Martikainen & Moisio, 1993 e Martinez et al., 1994).

Utilizando a mistura de argônio com 25% de CO₂ como gás de proteção, foram realizados 42 testes com o intuito de se determinar a faixa de operação do “keyhole”. Para tanto, foram variadas a corrente, a velocidade de soldagem e a vazão de gás de plasma, mantendo-se constante os demais parâmetros de soldagem apresentados no item 4.2. Os parâmetros de soldagem utilizados em cada um dos testes podem ser vistos na Tabela 4.2, onde a última coluna se refere aos resultados de soldagem, que foram expostos em termos de penetração e acabamento superficial da solda.

A penetração foi classificada em quatro níveis, baseado em uma análise visual: penetração correta (“keyhole” estável, que se mantém durante a soldagem), penetração excessiva (“keyhole” com reforço excessivo na raiz da solda, caracterizado pelo “humping”, ou o corte da junta), penetração incompleta (ausência do “keyhole”), penetração irregular (Cordão com comportamento variável entre “keyhole”, penetração incompleta e penetração excessiva).

Com relação ao acabamento do cordão de solda, foi adotada uma classificação subjetiva com quatro níveis, que foi baseada no aspecto visual: bom (acabamento de aspecto bom e uniforme), razoável (acabamento caracterizado por pequenas irregularidades), ruim (acabamento com intensa irregularidade) e péssimo (acabamento muito ruim com pontos de formação de vazios na superfície da solda).

TABELA 4.2: Condições e resultados dos testes utilizados para a determinação da faixa operacional do "keyhole".

Nº	Corrente (A)	Veloc. de soldagem (cm/min)	Vazão de gás de plasma (l/min)	Resultados	
				Penetração	Acabamento
1	150	13,5	1,6	Incompleta	Péssimo
2	150	13	1,8	Excessiva	-
3	150	13,5	1,8	Excessiva	-
4	150	14	1,8	Incompleta	Péssimo
5	150	15	1,8	Incompleta	Péssimo
6	150	16	1,8	Incompleta	Péssimo
7	160	13	1,3	Incompleta	Péssimo
8	160	13	1,9	Correta	Razoável
9	165	13	1,9	Correta	Razoável
10	170	13	1,9	Excessiva	-
11	175	15	1,8	Irregular	Razoável
12	175	17	1,8	Incompleta	Ruim
13	175	16	1,8	Irregular	Razoável
14	175	16,5	1,8	Incompleta	Razoável
15	175	16	1,6	Incompleta	Razoável
16	175	16	1,7	Irregular	Razoável
17	175	14	1,6	Excessiva	-
18	175	15	1,6	Incompleta	Razoável
19	200	20	1,8	Irregular	Ruim
20	200	23	1,8	Irregular	Ruim
21	200	21,5	1,8	Incompleta	Péssimo
22	200	20	1,6	Correta	Razoável
23	200	20	1,4	Correta	Razoável
24	200	20	1,3	Incompleta	Razoável
25	200	18	1,4	Incompleta	Razoável
26	200	16	1,4	Incompleta	Bom
27	200	14	1,4	Excessiva	-
28	200	15	1,4	Incompleta	Bom
29	225	20	1,8	Excessiva	-
30	225	23	1,8	Incompleta	Ruim
31	225	21,5	1,8	Incompleta	Razoável
32	225	21	1,8	Excessiva	-
33	225	21	1,6	Incompleta	Razoável
34	225	19	1,6	Incompleta	Razoável
35	225	17	1,6	Incompleta	Razoável
36	225	15	1,6	Excessiva	-
37	250	24	1,8	Irregular	Razoável
38	250	25	1,8	Correta	Razoável
39	250	25	1,0	Incompleta	Ruim
40	250	25	1,2	Incompleta	Ruim
41	250	25	1,6	Correta	Ruim
42	250	23	1,6	Incompleta	Ruim

Nos testes da Tabela 4.2, foram utilizados os seguintes parâmetros de soldagem: Gás de plasma: Argônio; Gás de proteção: Argônio + 25% CO₂; Vazão de gás de proteção: 8 l/min.; Ângulo de ponta do eletrodo: 60°; Diâmetro do bocal: 3,2 mm; Recuo do eletrodo: 2,35 mm; Diâmetro do eletrodo: 4,8 mm; Face da raiz: 6,0 mm; Distância tocha-peça: 6,0 mm.

Para uma corrente de soldagem de 150 A (testes de 1 a 6 da Tabela 4.2), mesmo variando-se a velocidade de soldagem e a vazão do gás de plasma, não foi possível encontrar uma condição estável para o “keyhole”. Nota-se claramente que se trata de uma condição inadequada por não existir uma faixa operacional do “keyhole” entre as condições de excesso de penetração e de penetração incompleta. O mau acabamento das soldas foi provavelmente causado pela intensa turbulência que o jato de plasma causou na poça de fusão, principalmente na ocorrência de falta de penetração total, onde os gases, sem um caminho de escape, retornam para a superfície e geram intensa agitação no metal líquido.

Verifica-se nos testes 3 e 4 da tabela 4.2, que a velocidade de transição entre penetração excessiva e penetração incompleta ficou entre 13 e 14 cm/min.. Mantendo-se a velocidade de soldagem em 13 cm/min. e elevando-se a corrente de soldagem para 160 A, inicialmente, para uma vazão de gás de plasma de 1,3 l/min. (teste 7 da Tabela 4.2), não se obteve penetração total. O aumento da vazão de gás para 1,9 l/min. (teste 8 da Tabela 4.2) foi suficiente para possibilitar o “keyhole”, que se manteve estável até o nível de corrente de 165 A (teste 9 da Tabela 4.2). Por outro lado, um aumento posterior da corrente de soldagem para 170 A (teste 10 da Tabela 4.2) gerou um aporte de calor excessivo, resultando em excesso de penetração.

Um fato curioso aparece quando se compara os resultados dos testes 2, 8 e 9 da Tabela 4.2. Os testes 8 e 9 foram caracterizados pela formação e manutenção do “keyhole” e o teste 2, com corrente de soldagem e vazão de gás de plasma inferiores, gerou penetração excessiva, quando, pela lógica, deveria fornecer penetração incompleta. Isto pode ser um indício de falta de repetibilidade deste processo para estas condições. Martikainen & Moisio (1993) citam que a ocorrência de instabilidade no “keyhole” e na poça de fusão pode resultar em discontinuidades, tais como: excesso de penetração, penetração incompleta e na presença conjunta do “keyhole”, penetração excessiva e penetração incompleta em um mesmo cordão de solda. Do analisado, pode-se supor que o resultado do teste 2 pode ter sido o efeito de um “keyhole” instável.

Os testes realizados com 175 A (testes 11 a 18 da Tabela 4.2) também apresentaram intensa instabilidade na manutenção do “keyhole”, problema este verificado nos testes 11, 13 e 16 da Tabela 4.2. Nestes testes, o cordão de solda foi caracterizado por variações bruscas, desde penetração excessiva até penetração incompleta. Com este nível de corrente não foi encontrada nenhuma condição de soldagem que permitisse a obtenção do “keyhole”.

Para um nível de corrente de 200 A (testes 19 a 28 da Tabela 4.2), os resultados se mostraram bastante contraditórios. A controvérsia a respeito dos resultados aparece quando se compara situações como, por exemplo, o teste 23 que forneceu um “keyhole” estável com os testes 25 e 26 que, mesmo com velocidades de soldagem menores, forneceram penetração incompleta. Isto demonstra uma falta de repetibilidade de resultados para estas condições de soldagem.

O testes 29 a 36 da Tabela 4.2, que foram realizados com um nível de corrente de 225 A, não forneceram bons resultados para a formação e manutenção do “keyhole”. Estes testes foram marcados por intensa instabilidade, pois não se conseguiu estabelecer uma condição favorável ao “keyhole”. Os resultados mostram a passagem abrupta de uma condição de falta de penetração para uma condição com excesso de penetração, semelhante ao observado anteriormente.

Para um nível de corrente de 250 A (testes 37 a 42 da Tabela 4.2), conseguiu-se estabelecer uma condição favorável à manutenção do “keyhole” quando se utilizou uma velocidade de soldagem de 25 cm/min. e uma vazão do gás de plasma de 1,8 l/min. (teste 38 da Tabela 4.2). Apesar deste resultado, não foi verificado a repetibilidade destas condições, pois pequenas variações na velocidade de soldagem e na vazão do gás de plasma desestabilizaram o “keyhole”, como pode ser visto nos testes 37 e 41 da Tabela 4.2.

Apesar de não terem sido obtidos resultados satisfatórios para a determinação de uma faixa de variáveis de soldagem onde o “keyhole” se mantivesse estável, estes testes (Tabela 4.2) permitiram tirar algumas conclusões interessantes. Pôde-se notar que a utilização de uma mistura de argônio com 25% de CO₂ como gás de proteção produziu um acabamento superficial das soldas melhor do que aqueles produzidos pela utilização do argônio puro. Tal fato pode ser apurado através da Figura 4.3, que mostra uma comparação no acabamento da solda com a utilização do argônio puro e da mistura de argônio com 25% de CO₂. Entretanto, observou-se a presença de escória sobre a superfície das soldas obtidas com uma proteção de argônio com 25% de CO₂, que pode ter sido ocasionada por reações que ocorrem entre o oxigênio contido no gás de proteção e a poça de fusão.

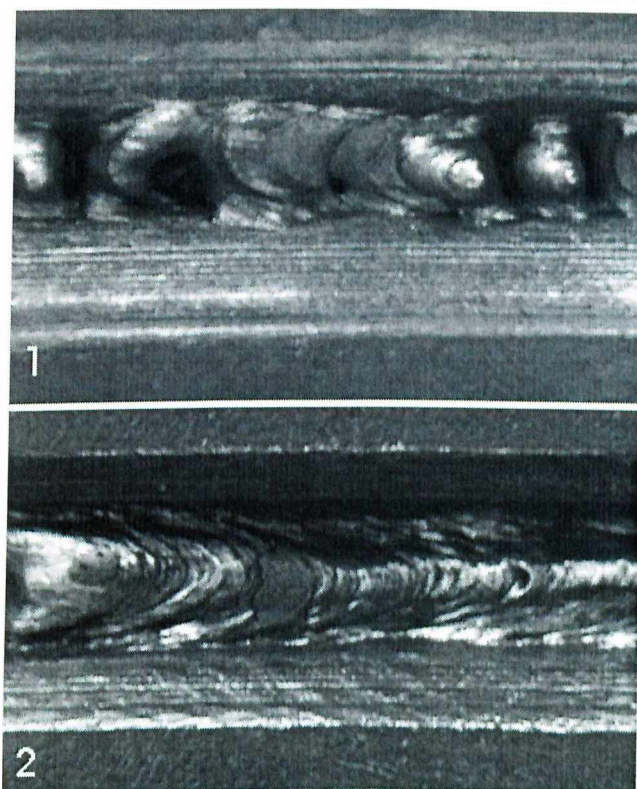


FIGURA 4.3: Acabamento superficial obtido com proteção gasosa de argônio puro [1 - Corrente: 245 A; veloc. de soldagem: 17 cm/min.; Vazão de gás de plasma (Ar): 1,8 l/min.] e de argônio com 25% de CO₂ [2 - Corrente: 250 A; Veloc. de soldagem: 25 cm/min.; Vazão de gás de plasma (Ar): 1,8 l/min.].

Os testes até aqui realizados mostraram que as condições de soldagem utilizadas não forneceram condições para garantir a soldagem da junta de maneira satisfatória. Para prosseguir o estudo é preciso obter uma maior estabilidade do “keyhole” e, desta forma, garantir a repetibilidade do cordão de solda. Para tanto, foram propostas a redução do diâmetro do bocal de constrição e da face da raiz da junta, mantendo a mistura de argônio com 25% de CO₂ como gás de proteção. O aumento da densidade de energia e a redução da quantidade de material a fundir na região da junta poderiam melhorar as condições de manutenção do “keyhole”.

4.5- Alteração do diâmetro do orifício constritor e da face da raiz (nariz) da junta

Para melhorar as condições de obtenção do “keyhole”, foram propostas a redução do diâmetro do orifício constritor de 3,2 para 2,8 mm e da face da raiz (nariz) da junta de 6,0 para 5,0 mm. Tanto a redução do orifício constritor como a da face da raiz atuariam sobre a

estabilidade do processo, diminuindo as dimensões da poça de fusão produzida. Segundo Garcia & Norrish (1995), quanto maior as dimensões da poça de fusão, mais difícil é o controle do processo que ocorre em função do desequilíbrio entre as forças que atuam sobre esta.

A redução da face da raiz da junta contribuiria para reduzir a coluna de metal líquido, reduzindo o seu peso e, conseqüentemente, os possíveis desequilíbrios nas forças que atuam sobre poça de fusão. Segundo Houldcroft & John (1988) o aumento excessivo da espessura das peças a serem soldadas torna o processo instável. Do mesmo modo, a redução da face da raiz da junta poderia trazer benefícios para a estabilidade do “keyhole”. A redução do orifício constritor produziria um arco mais estreito, que também iria determinar uma poça de fusão de dimensões menores. Por outro lado, como o efeito de constrição do arco seria maior, a concentração de energia e a penetração seriam maiores.

Com esta alteração, foram conduzidos 10 testes onde se variou a corrente, a velocidade de soldagem e a vazão de gás de plasma. Estes testes permitiram determinar a condição em que se conseguiu obter um “keyhole” estável. Com a determinação desta condição inicial, procurou-se testar condições próximas, variando-se a corrente de soldagem e verificando a regularidade do cordão de solda para estas condições. A Tabela 4.3 mostra as condições de soldagem que foram testadas e os resultados da soldagem. A análise dos cordões de solda seguiu os mesmos critérios que foram utilizados nos testes da Tabela 4.2.

Em todos os testes realizados, a formação inicial do “keyhole” necessitou de um retardo no acionamento do movimento da tocha por alguns segundos após a abertura do arco. Este procedimento garantiu que todos os cordões de solda fossem iniciados com o “keyhole”. A manutenção ou não da regularidade do cordão de solda foi determinada pela estabilidade do “keyhole”.

Foi observado ao longo desta etapa, que as características do cordão de solda são bastante influenciadas pela maneira como a solda é iniciada. O procedimento mais usual é retardar alguns segundos o acionamento do movimento da tocha até a correta formação do “keyhole”, que deve se manter durante toda a extensão da solda. Entretanto, se o acionamento do movimento da tocha ocorrer antes da formação do “keyhole”, o comportamento do cordão de solda durante a soldagem será completamente diferente, gerando normalmente penetração incompleta. Portanto, para cada caso de soldagem deve-se estabelecer o tempo correto até a formação do “keyhole”, para então, dar início à operação de soldagem.

TABELA 4.3: Condições e resultados dos testes feitos para a verificação da regularidade do cordão de solda.

Teste	Corrente (A)	Velocidade de soldagem (cm/min)	Vazão de gás de plasma (l/min)	Resultados	
				Penetração	Acabamento
1	250	14	1,0	Excessiva	-
2	240	14	1,0	Excessiva	-
3	230	14	1,0	Correta	bom
4	220	14	1,0	Correta	bom
5	220	14	1,0	Correta	bom
6	210	14	1,0	Correta	bom
7	200	14	1,0	Correta	bom
8	190	14	1,0	Correta	bom
9	185	14	1,0	Incompleta	bom
10	180	14	1,0	Incompleta	bom

onde:

Gás de proteção: argônio + 25% CO₂; Vazão de gás de proteção: 4,5 l/min.; Gás de plasma: argônio; Ângulo de ponta do eletrodo: 60°; Diâmetro do bocal: 2,8 mm; Recuo do eletrodo: 2,35 mm; Diâmetro do eletrodo: 4,8 mm; Face da raiz: 5,0 mm; Distância tocha-peça: 6,0 mm.

Os resultados dos testes da Tabela 4.3 mostram uma relativa regularidade do cordão de solda para estas condições. Os testes 1 e 2 da Tabela 4.3 indicam condições extremas de aporte de calor, que resultaram no corte da junta. Níveis de corrente entre 230 e 190 A (testes 3 a 8 da Tabela 4.3) forneceram condições adequadas de soldagem, resultando na obtenção de um “keyhole” estável. Dentro desta faixa, a variação da corrente de soldagem não alterou a estabilidade do “keyhole”. O nível de corrente de 190 A (teste 8 da Tabela 4.3) foi o menor valor que possibilitou a soldagem através da técnica “keyhole”, a partir do qual se observou o desenvolvimento de uma situação de falta de penetração total na junta (testes 9 e 10 da Tabela 4.3). A análise dos resultados obtidos com a variação gradual do aporte de calor (corrente de soldagem) permitiu a localização da região operacional do “keyhole” para esta operação de soldagem.

O acabamento superficial das soldas se manteve uniforme e de boa qualidade. As Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 mostram respectivamente, a parte superior e inferior do “keyhole” produzido no final da solda e o acabamento superficial do cordão de solda em um dos testes apresentados na Tabela 4.3.

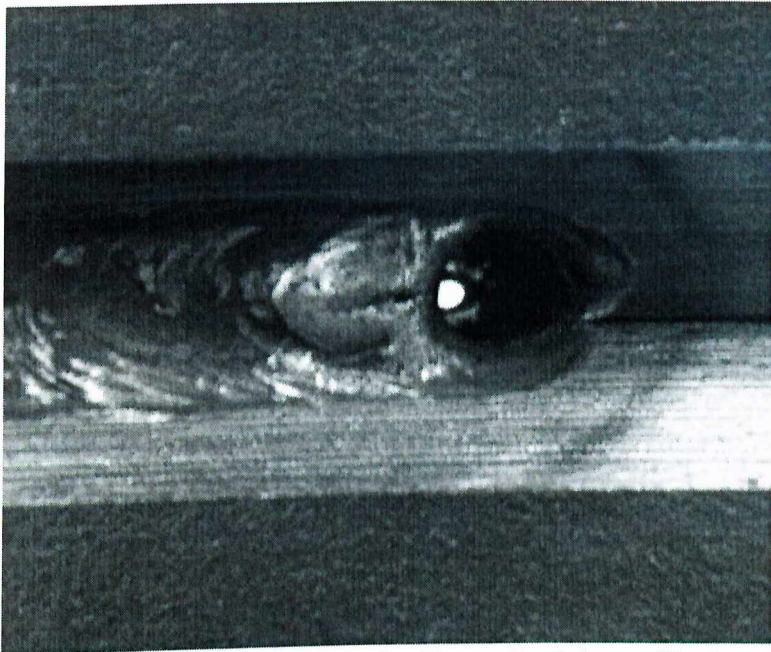


FIGURA 4.4: Vista superior do “keyhole” produzido no final do cordão de solda.

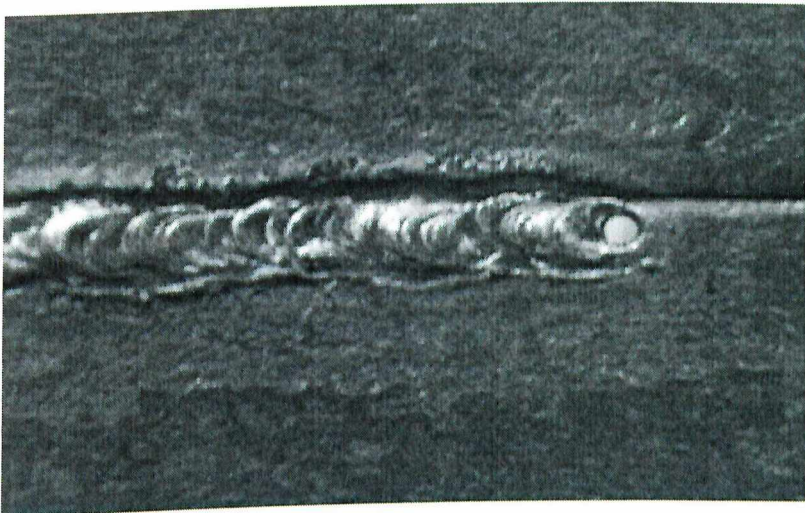


FIGURA 4.5: Vista da raiz da solda.

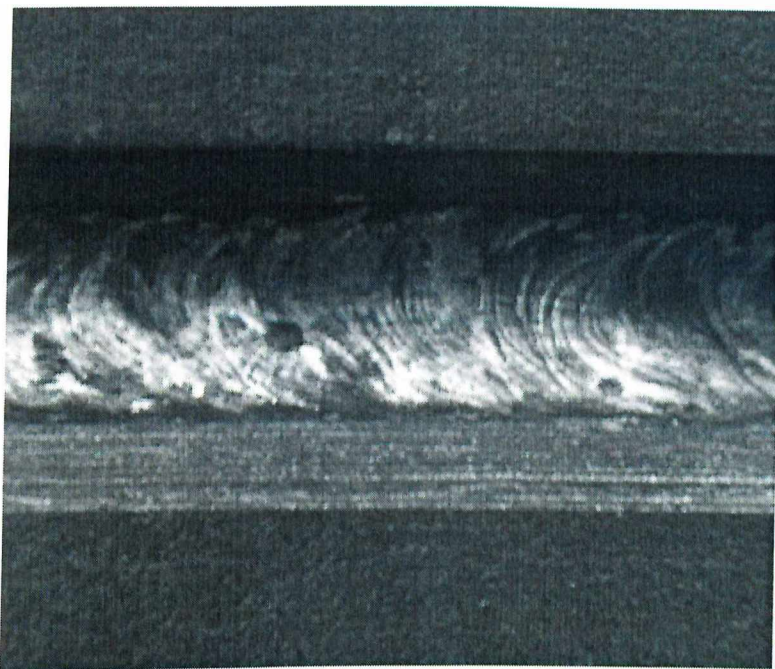


FIGURA 4.6: Acabamento superficial do cordão de solda obtido nos testes da Tabela 4.3.

4.6- Determinação dos limites máximo e mínimo das variáveis de soldagem para o planejamento do experimento

Para um estudo sistemático a respeito do passe de raiz pela técnica “keyhole” de soldagem, deve-se estabelecer os extremos das variáveis de soldagem em consonância com os resultados obtidos no item 4.5. Após a determinação dos limites extremos das variáveis de soldagem, procede-se o planejamento do experimento que vai determinar o envelope operacional.

Como a faixa de variáveis abordada na Tabela 4.3 se mostrou satisfatória, outros testes foram conduzidos para a determinação dos limites extremos para a corrente, velocidade de soldagem e vazão de gás de plasma. Baseado nos resultados apresentados na Tabela 4.3, fixou-se os valores máximo e mínimo da corrente de soldagem a serem utilizados em 220 e 190 A, respectivamente. Para cada um destes valores de corrente foram variadas a velocidade de soldagem e a vazão de gás de plasma em torno dos valores utilizados na Tabela 4.3, ou seja, 14 cm/min. e 1,0 l/min..

Nos testes realizados, verificou-se que era possível, para uma corrente de soldagem de 220 A, obter um “keyhole” estável utilizando uma velocidade de soldagem de 16 cm/min. e uma vazão de gás de plasma de 0,8 l/min.. Para uma corrente de 190 A, um “keyhole” estável

foi obtido mediante a utilização de uma velocidade de soldagem de 12 cm/min. e uma vazão de gás de plasma de 1,2 l/min.. Estas condições de soldagem indicam que é possível manter a condição do “keyhole” variando os parâmetros de soldagem dentro de certas faixas de operações, sendo estas:

Corrente: 190 a 220 A.

Velocidade de soldagem: 12 a 16 cm/min.

Vazão do gás de plasma: 0,8 a 1,2 l/min.

Para a determinação do envelope operacional, dividiu-se a corrente em 4 níveis e a velocidade de soldagem e a vazão de gás de plasma em 3 níveis para, a partir destes níveis, realizar o planejamento do experimento. Os níveis de cada uma das variáveis de soldagem foram:

Corrente: 190, 200, 210 e 220 A.

Velocidade de soldagem: 12, 14 e 16 cm/min.

Vazão de gás de plasma: 0,8, 1,0 e 1,2 l/min.

5- RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1- Introdução

Neste capítulo é descrito um estudo sistemático feito para a determinação do envelope operacional, utilizando a técnica “keyhole” na soldagem do passe de raiz de uma junta em V. Este estudo foi baseado em um planejamento experimental feito a partir dos testes preliminares, cujos resultados servirão para a elaboração deste envelope operacional. Em seguida, foi feita uma verificação da repetibilidade dos resultados dentro do envelope operacional. Finalmente, foi feito o estudo do efeito de fatores de soldagem na repetibilidade dos resultados do envelope operacional.

5.2- Planejamento do experimento

O planejamento do experimento foi baseado nos níveis das variáveis de soldagem definidos no item 4.6 do capítulo 4 (testes preliminares). Busca-se, através do planejamento do experimento, dar um embasamento estatístico aos resultados de soldagem e determinar o envelope operacional do passe de raiz através da técnica “keyhole” de soldagem. Através do método fatorial completo de planejamento de experimento foram estabelecidas todas as combinações possíveis para os níveis pré determinados, resultando em 36 ($4 \times 3 \times 3 = 36$) combinações diferentes, que representam cada um dos ensaios a serem realizados. As combinações determinadas através do planejamento experimental serão apresentadas no próximo item, que se refere à determinação do envelope operacional.

5.3- Determinação do envelope operacional

O envelope operacional é determinado a partir da realização dos ensaios prescritos pelo planejamento do experimento. A Tabela 5.1 mostra todas as combinações possíveis entre os níveis pré estabelecidos de corrente, velocidade de soldagem e vazão de gás de plasma e a análise dos resultados de soldagem. O critério utilizado para avaliar os cordões de solda prevê quatro possíveis classificações, baseada em uma análise visual da penetração, as quais são:

- Penetração correta: Designação dada aos cordões de solda onde o “keyhole” se manteve estável durante a soldagem do corpo de prova. Nestes casos, a aparência da superfície e da raiz da solda se mantiveram regular.
- Penetração excessiva: Designação dada aos cordões de solda em que ocorreu o corte da junta ou naqueles em que se observou a manutenção do “keyhole” ao longo da solda, porém com reforço excessivo na raiz da solda, com a ocorrência do defeito “humping”.
- Penetração incompleta: Designada aos cordões de solda que não apresentaram a manutenção do “keyhole” e que, por isso, não forneceram penetração total na junta.
- Penetração irregular: Designada aos cordões de solda com instabilidade no “keyhole”, acarretando em penetração excessiva e/ou incompleta.

Para o nível de corrente de 190 A (testes 1 a 9 da Tabela 5.1), as situações que proporcionaram a manutenção do “keyhole” foram aquelas com velocidade de soldagem de 12 cm/min.. Nestas condições, o aumento da vazão de gás de plasma de 0,8 até 1,2 l/min. não causou interferência na regularidade do cordão de solda (testes 1, 2 e 3 da Tabela 5.1). Para as velocidades de soldagem de 14 e 16 cm/min. (testes 4 a 9 da Tabela 5.1), a redução do aporte térmico foi grande o suficiente para impedir a manutenção do “keyhole”, gerando soldas com penetração incompleta.

Com estes resultados, foi possível verificar que o aumento da velocidade de soldagem reduziu o aporte térmico, provocando a desestabilização do “keyhole” e a formação de soldas com penetração incompleta. Estes resultados estão de acordo com as observações de Martikainen & Moisio (1993), em que a manutenção do “keyhole” ocorre mediante adequadas combinações entre os parâmetros de soldagem, dentre eles, corrente, velocidade de soldagem e vazão de gás de plasma. Dentro deste aspecto o aumento da velocidade de soldagem em relação aos outros parâmetros resultou em perda de penetração e na não obtenção do “keyhole”.

O aumento da corrente de soldagem de 190 para 200 A (testes 10 a 18 da Tabela 5.1) resultou na ampliação da faixa de operação do “keyhole”. Um resultado inesperado foi obtido no teste 10, que comparado ao teste 13 (velocidade de soldagem maior) ou ao teste 1 (corrente menor), deveria, pela lógica, gerar o “keyhole” e não falta de penetração. A principal hipótese para este resultado seria a ocorrência de instabilidade nas condições de manutenção do “keyhole”, ou seja, estas condições de soldagem podem não estar com os parâmetros adequadamente ajustados para garantir a repetibilidade dos resultados.

TABELA 5.1: Planejamento do experimento e resultados dos testes.

Teste	Corrente (A)	Velocidade de soldagem (cm/min)	Vazão de gás de plasma (l/min)	Resultado da soldagem (Penetração)
1	190	12	0,8	Correta
2	190	12	1,0	Correta
3	190	12	1,2	Correta
4	190	14	0,8	Incompleta
5	190	14	1,0	Incompleta
6	190	14	1,2	Incompleta
7	190	16	0,8	Incompleta
8	190	16	1,0	Incompleta
9	190	16	1,2	Incompleta
10	200	12	0,8	Incompleta
11	200	12	1,0	Correta
12	200	12	1,2	Correta
13	200	14	0,8	Correta
14	200	14	1,0	Correta
15	200	14	1,2	Correta
16	200	16	0,8	Incompleta
17	200	16	1,0	Incompleta
18	200	16	1,2	Correta
19	210	12	0,8	Excessiva
20	210	12	1,0	Excessiva
21	210	12	1,2	Excessiva
22	210	14	0,8	Incompleta
23	210	14	1,0	Correta
24	210	14	1,2	Excessiva
25	210	16	0,8	Incompleta
26	210	16	1,0	Incompleta
27	210	16	1,2	Correta
28	220	12	0,8	Excessiva
29	220	12	1,0	Excessiva
30	220	12	1,2	Excessiva
31	220	14	0,8	Incompleta
32	220	14	1,0	Excessiva
33	220	14	1,2	Excessiva
34	220	16	0,8	Incompleta
35	220	16	1,0	Excessiva
36	220	16	1,2	Excessiva

onde:

Gás de proteção: argônio + 25% CO₂; Vazão de gás de proteção: 4,5 l/min.; Gás de plasma: argônio; Ângulo de ponta do eletrodo: 60°; Diâmetro do bocal: 2,8 mm; Recuo do eletrodo: 2,35 mm; Diâmetro do eletrodo: 4,8 mm; Face da raiz: 5,0 mm; Distância tocha-peça: 6,0 mm.

Os resultados obtidos utilizando-se 1,0 e 1,2 l/min. como vazão de gás de plasma, para a velocidade de soldagem de 12 cm/min. (testes 11 e 12 da Tabela 5.1), mostraram-se satisfatórios com relação à manutenção do “keyhole”. Isto indica que o aumento da vazão de gás de plasma de 0,8 l/min. (teste 10) para 1,0 l/min. (teste 11) atuou no sentido de dar mais estabilidade na manutenção do “keyhole”. Segundo Quintino et al. (1992), a pressão do arco sobre a poça de fusão, definida pelo tipo e pela vazão do gás de plasma, tem grande influência sobre a manutenção do “keyhole”, uma vez que tende a deslocar o metal fundido para as extremidades da poça de fusão. Esta observação explica a evolução de uma situação de falta de penetração observada no teste 10 para a formação de um “keyhole” estável com o aumento da vazão de gás de plasma (testes 11 e 12). Entretanto, deve-se salientar que o aumento exagerado da vazão do gás de plasma pode resultar na expulsão do metal líquido da poça de fusão, causando penetração excessiva.

O mesmo argumento, baseado na pressão do arco citada por Quintino et al. (1992), pode ser utilizado para explicar a controvérsia entre os resultados dos testes 10 (falta de penetração) e 1 (“keyhole”) da Tabela 5.1. Ambos os testes foram realizados com as mesmas velocidade de soldagem e vazão de gás de plasma, diferindo apenas na corrente utilizada, sendo 190 A no teste 1 e 200 A no teste 10. De acordo com o trabalho citado acima, a menor amperagem induz a formação de uma poça de fusão menor, de modo que uma menor pressão do arco (vazão de gás de plasma) é requerida para manter o orifício do “keyhole” aberto. No caso dos testes 1 e 10, a vazão de gás de plasma foi de 0,8 l/min..

Todas as três condições em que se utilizou a velocidade de 14 cm/min. para uma corrente de 200 A (testes 13 a 15 da Tabela 5.1) forneceram condições adequadas de soldagem. Para uma velocidade de soldagem de 16 cm/min. (testes 16, 17 e 18 da Tabela 5.1), o “keyhole” somente foi conseguido mediante a utilização de uma vazão de gás de plasma de, no mínimo, 1,2 l/min., face a redução da penetração pelo aumento da velocidade de soldagem em relação às condições anteriores.

Para o nível de corrente de soldagem de 210 A (testes 19 a 27 da Tabela 5.1), a faixa de operação do “keyhole” ficou bastante reduzida. Para uma velocidade de 12 cm/min., independente da vazão de gás utilizada, todos os testes indicaram uma condição extrema de aporte de calor, que se traduziu em penetração excessiva. Para uma velocidade de 14 cm/min. e vazão de gás de 1,0 l/min. (teste 23) foi obtida a condição do “keyhole”, enquanto que para vazões de 0,8 l/min. (teste 22) e de 1,2 l/min. (teste 24) obteve-se falta de penetração total e penetração excessiva, respectivamente. Para uma velocidade de 16 cm/min., a redução do

aporte de calor limitou a formação do “keyhole” para uma vazão de, no mínimo, 1,2 l/min. de gás de plasma.

O nível de corrente de 220 A (testes 28 a 36 da Tabela 5.1) se mostrou uma condição muito extrema, marcada por irregularidade no cordão de solda como resultado de um inadequado ajuste entre os parâmetros de soldagem. Nenhum teste forneceu condições favoráveis à manutenção do “keyhole”. A irregularidade do cordão de solda para esta condição, é revelada pela passagem abrupta de uma condição de falta de penetração, para uma condição de penetração excessiva através da variação da velocidade de soldagem e da vazão do gás de plasma.

A instabilidade observada para o nível de corrente de 220 A pode ser consequência de uma poça de fusão de grandes dimensões, definida pelo elevado nível de corrente para esta situação de soldagem. Garcia & Norrish (1995) mostraram que o aumento das dimensões da poça de fusão com o aumento da corrente de soldagem resulta em uma situação de difícil controle sobre a manutenção do “keyhole”.

As Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 mostram de forma gráfica a região de formação do “keyhole” para vazões de gás de plasma de 0,8 l/min., 1,0 l/min. e 1,2 l/min., respectivamente. Estas figuras foram confeccionadas a partir dos resultados da Tabela 5.1. A Figura 5.4 mostra um esquema tridimensional da região considerada como sendo o envelope operacional para o caso em estudo.

A primeira vista, a observação das Figuras 5.1 a 5.3 indica que o aumento da vazão do gás de plasma resultou na expansão da faixa de operação do “keyhole”. Para uma vazão de gás de plasma de 0,8 l/min. (Figura 5.1), a região em que a formação do “keyhole” foi observada é muito estreita, sendo representada por uma linha. O aumento da vazão de gás de plasma ampliou a região operacional de modo que, para uma vazão de 1,2 l/min. (Figura 5.3), a região de formação do “keyhole” assumiu dimensões consideráveis, com a faixa operacional sendo representada por uma área.

Os resultados obtidos para vazões de gás de plasma de 1,0 e 1,2 l/min. (Figuras 5.2 e 5.3), mostraram-se bastante coerentes em relação às suas condições de soldagem, evidenciando uma correta e visível separação entre pontos onde ocorreram penetração incompleta, “keyhole” e penetração excessiva. Isto demonstra que, para estas condições de soldagem, o ajuste dos parâmetros de soldagem foi adequado e proporcionou relativa regularidade ao cordão de solda.

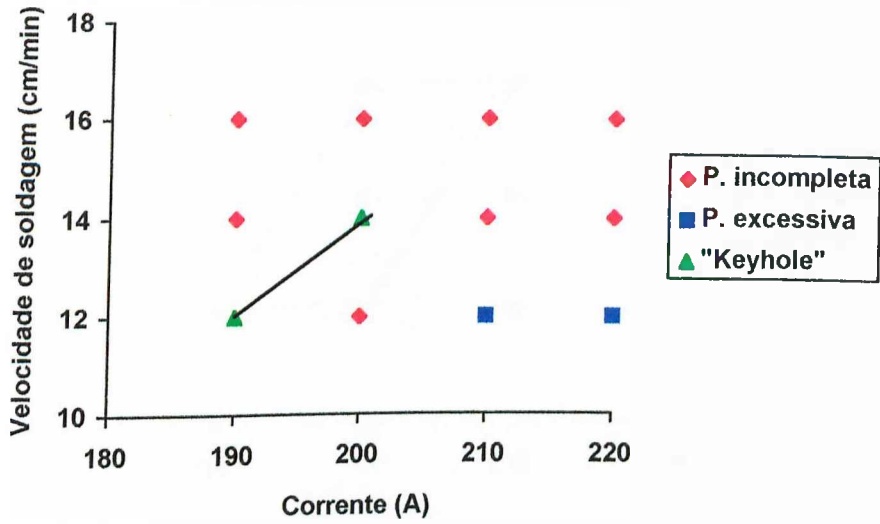


FIGURA 5.1: Região de obtenção do "keyhole" para uma vazão de gás de plasma de 0,8 l/min..

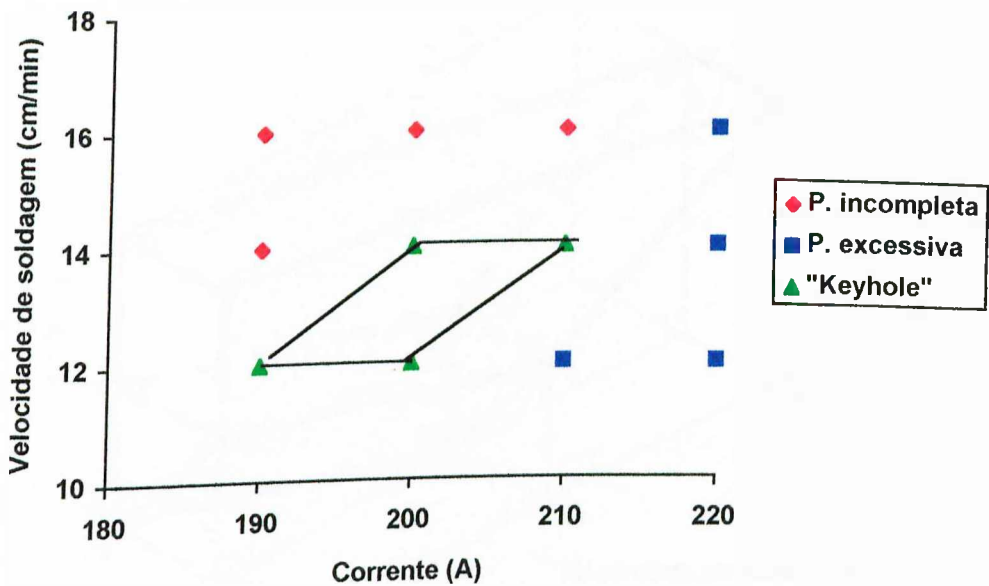


FIGURA 5.2: Região de obtenção do "keyhole" para uma vazão de gás de plasma de 1,0 l/min..

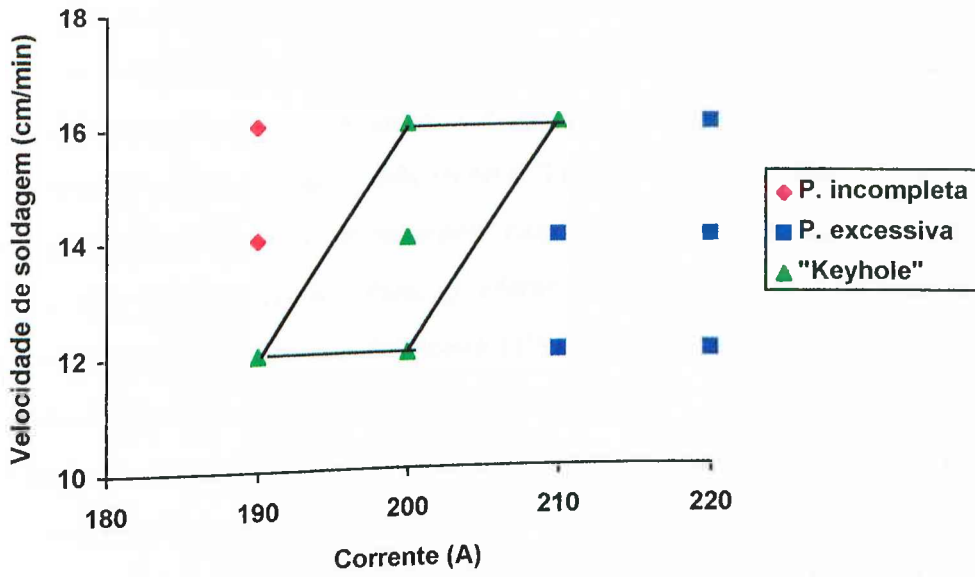


FIGURA 5.3: Região de obtenção do "keyhole" para uma vazão de gás de plasma de 1,2 l/min..

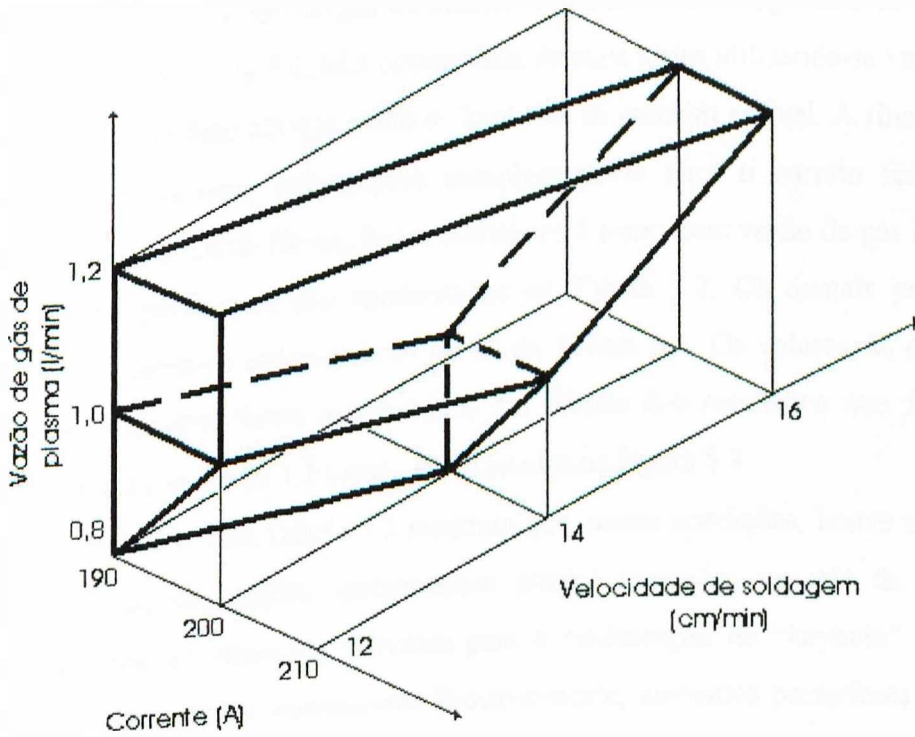


FIGURA 5.4: Envelope operacional do passe de raiz pela técnica "keyhole".

Por outro lado, os resultados obtidos a partir de uma vazão de gás de plasma de 0,8 l/min. (Figura 5.1) não expressaram a mesma coerência, não evidenciando de forma clara, a separação entre os pontos de falta de penetração e de obtenção do "keyhole". Isto ocorreu, provavelmente, devido ao fato da vazão de 0,8 l/min. de gás de plasma representar o limite mínimo necessário para a soldagem pela técnica "keyhole" e, neste caso, não propiciar um adequado ajuste dos parâmetros de soldagem para assegurar a estabilidade do "keyhole". Condições limites são situações extremas, geradoras de instabilidade no "keyhole" e na poça de fusão que, segundo Martikainen & Moisio (1993), podem resultar em descontinuidades tais como penetração incompleta e/ou penetração excessiva.

O aumento da vazão de gás de plasma resulta no aumento da velocidade do jato de plasma e, conseqüentemente, no aumento da pressão de estagnação (pressão do arco sobre a poça de fusão), o que facilita a formação e manutenção do "keyhole". Entretanto, o aumento da velocidade do jato de plasma vai gerar uma maior força de arraste sobre a poça de fusão, tendendo a aumentar cada vez mais a penetração. A manutenção de um "keyhole" estável vai depender muito do equilíbrio entre estes dois efeitos. Foi observado nas Figuras 5.1 a 5.3, que o aumento da vazão de gás de plasma conferiu cada vez mais estabilidade ao "keyhole", que se reproduziu no aumento da região operacional.

Se o aumento da vazão do gás de plasma introduziu maior regularidade no cordão de solda, como mostra a Figura 5.4, há a necessidade de mais testes utilizando-se vazões maiores que 1,2 l/min. para definir até que ponto o "keyhole" se mantém estável. A finalidade destes testes seria a de fornecer informações complementares para o correto fechamento do envelope operacional. Desta forma, foram realizados 5 testes com vazão de gás de plasma de 1,3 l/min., cujos parâmetros são apresentados na Tabela 5.2. Os demais parâmetros de soldagem são os mesmos utilizados nos testes da Tabela 5.1. Os valores da corrente e da velocidade de soldagem foram selecionados em função dos resultados que forneceram o "keyhole" para uma vazão de 1,2 l/min., apresentados na Figura 5.3.

Os testes 1, 2 e 3 da Tabela 5.2 mostram que, nestas condições, houve a manutenção do "keyhole", mas os cordões apresentaram reforço excessivo na raiz da solda. Estas condições representam situações extremas para a manutenção do "keyhole" e definem o limite superior do envelope operacional. Provavelmente, aumentos posteriores na vazão do gás de plasma resultariam no corte da junta.

TABELA 5.2: Resultados dos testes realizados para o fechamento do envelope operacional.

Teste	Corrente (A)	Velocidade de soldagem (cm/min)	Resultado
1	190	12	“keyhole” *
2	200	12	“keyhole” *
3	200	14	“keyhole” *
4	200	16	“keyhole”
5	210	16	“keyhole”

Onde:

Vazão de gás de plasma: 1,3 l/min..

* Reforço excessivo na raiz da solda, isto é, quase ocorreu o corte da junta.

Os testes 4 e 5 da Tabela 5.2 forneceram condições para a manutenção do “keyhole” e o reforço da raiz da solda se manteve dentro de um certo limite. Os testes da Tabela 5.2 mostraram que o limite superior da vazão de gás de plasma para o envelope operacional é de 1,3 l/min. e que desenvolvimentos posteriores não se justificariam devido ao fato de se entrar em uma região operacional muito estreita e, provavelmente, com excessiva instabilidade do “keyhole”. A Figura 5.5 mostra o envelope operacional concluído após a realização destes testes.

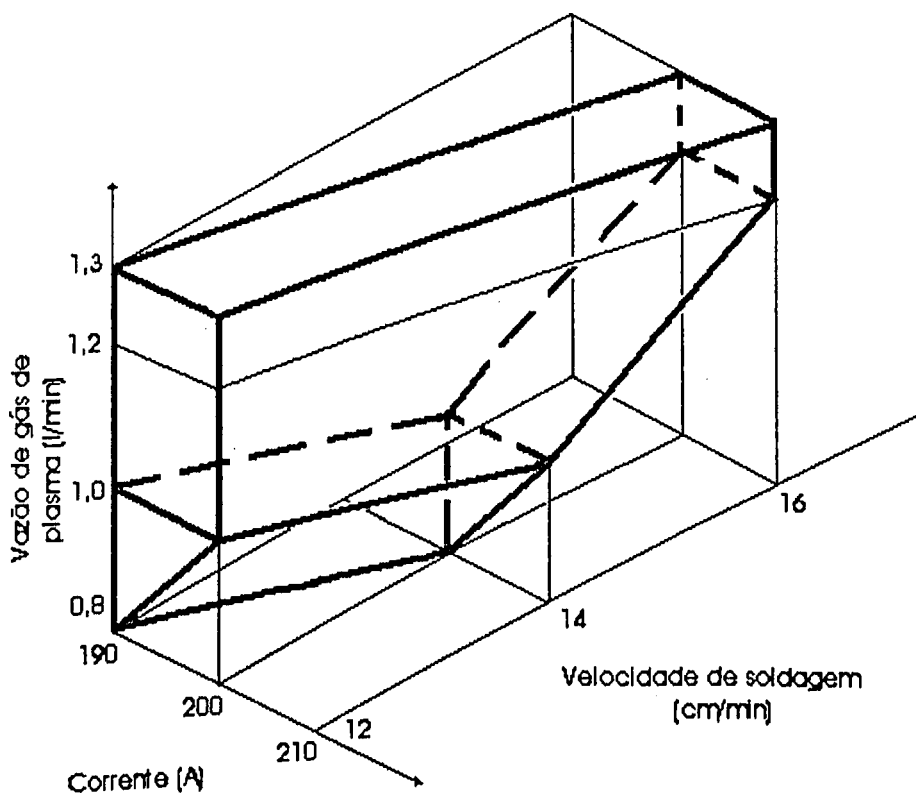


FIGURA 5.5: Envelope operacional completo.

As condições que proporcionaram a manutenção do “keyhole” apresentaram um bom acabamento superficial dos cordões de solda, conseguido através de um ajuste adequado entre os parâmetros de soldagem. Nestas condições, o fluxo de gás de plasma garantiu a abertura do “keyhole”, sem contudo gerar agitação na poça de fusão. Por outro lado, as velocidades de soldagem utilizadas permitiram uma adequada molhabilidade da poça de fusão para os níveis de corrente do envelope operacional.

Entretanto, como consequência da utilização de um gás ativo como gás de proteção, foi observado a formação de uma fina camada de escória sobre o cordão de solda. Este problema foi verificado também no trabalho de Martikainen & Moisio (1993) onde, para resolver este problema, foi indicado a adição de elementos desoxidantes à poça de fusão, seja através da alimentação de arame eletrodo, seja através da adição de pós metálicos.

5.4- Validação do envelope operacional

O envelope operacional é a região das condições de soldagem que efetivamente possibilitam a soldagem do passe de raiz através da técnica “keyhole”. Qualquer condição extraída do interior deste deve resultar na habilitação da técnica “keyhole” de soldagem e a sua validação prevê a repetibilidade de resultados para qualquer uma destas condições.

Duas condições de soldagem foram selecionadas para testar o envelope operacional quanto a sua confiabilidade em termos de repetibilidade de resultados. As condições de soldagem são apresentadas abaixo:

Condição 1- Corrente: 205 A.

Velocidade de soldagem: 13,5 cm/min.

Vazão de gás de plasma: 1,1 l/min.

Condição 2- Corrente: 200 A.

Velocidade de soldagem: 15 cm/min.

Vazão de gás de plasma: 1,2 l/min.

Os demais parâmetros de soldagem foram os mesmos utilizados nos ensaios para a determinação do envelope operacional apresentados na Tabela 5.1. A Tabela 5.3 mostra os resultados obtidos com as condições 1 e 2. Todos os corpos de prova dessa tabela foram

cortados em sua seção transversal para a realização da análise geométrica (medidas de penetração e de reforço da raiz da solda).

Os critérios de avaliação dos cordões para a verificação da repetibilidade dos resultados dentro do envelope operacional são os seguintes (vide a Figura 3.8 do capítulo 3):

- Penetração adequada: reforço da raiz da solda até 2 mm (“keyhole” estável).
- Penetração incompleta: não verificação do “keyhole”.
- Penetração excessiva: reforço da raiz da solda acima de 2 mm.
- Penetração irregular: cordão de solda com penetração na raiz da solda variando de adequada a excessiva.

A determinação do valor limite do reforço da raiz que define a instabilidade do “keyhole” foi baseada no trabalho de Hoffmeister et al. (1996). Segundo este trabalho, o valor máximo do reforço da raiz da solda que garante um “keyhole” estável é de 2 mm. Valores acima de 2 mm para o reforço da raiz da solda representam condições próximas ao corte da junta, fornecendo, nestas situações, um “keyhole” instável e não repetibilidade de resultados.

TABELA 5.3: Resultados dos testes realizados para a validação do envelope operacional.

Teste	Condição	Penetração	Condição da raiz da solda
			Reforço (mm)
1	1	incompleta	-1,62
2	1	adequada	0,23
3	1	adequada	1,87
4	1	incompleta	-0,40
5	1(*)	excessiva	2,15
6	2	adequada	1,68
7	2	irregular	-1,2 a 3,0
8	2	adequada	0,66
9	2	excessiva	3,35
10	2(**)	incompleta	-1,19

(*) Nível de corrente de 207 A para a condição 1.

(**) Vazão de gás de plasma de 1,15 l/min. para a condição 2.

OBS.: O sinal negativo do reforço refere-se à falta de penetração em relação à base da chapa.

A condição 1 de soldagem (testes 1 a 5 da Tabela 5.3) apresentou a tendência de gerar cordões de solda com penetração incompleta ou com penetração adequada. Isto demonstra que esta condição não garante a repetibilidade dos resultados do envelope operacional. Em

uma tentativa de se obter um cordão de solda com penetração total e “keyhole” estável, foi feito um ensaio com a condição 1(*) (teste 5 da Tabela 5.3), onde a corrente de soldagem foi alterada de 205 para 207 A. Entretanto, esta tentativa não apresentou resultados satisfatórios gerando penetração excessiva. Apesar da obtenção inicial do “keyhole” em todos os testes, verificou-se durante a soldagem que em alguns testes houve a sua deterioração, o que resultou na falta de repetibilidade desta condição de soldagem.

A condição 2 de soldagem (testes 6 a 10 da Tabela 5.3) apresentou a tendência de gerar soldas com “keyhole” estável (penetração completa e regular) e com penetração excessiva. Esta condição também apresentou um cordão de solda com alguma irregularidade, não apresentando repetibilidade de resultados. A utilização da condição 2(**) (teste 10 da Tabela 5.3), onde a vazão de gás de plasma foi reduzida de 1,2 para 1,15 l/min., não garantiu uma melhora na regularidade do cordão de solda, gerando um cordão de solda sem a penetração desejada. Nesta condição de soldagem, os testes também foram iniciados com o “keyhole”, mas da mesma forma que os testes da condição 1, houve a deterioração do “keyhole” em alguns dos testes.

Os resultados apresentados na Tabela 5.3 não se mostraram satisfatórios para garantir a validação do envelope operacional proposto no item 5.3. Embora as condições selecionadas para a validação do envelope operacional apresentarem a tendência de gerar o “keyhole”, algum fator agiu de forma a propiciar o surgimento de irregularidade no cordão de solda, comprometendo os resultados de repetibilidade. Os fatores que provavelmente podem estar relacionados com a falta de repetibilidade na soldagem são:

- a) Problemas relacionados aos equipamentos de soldagem: A falta de repetibilidade pode estar relacionado à manutenção dos parâmetros de soldagem por parte dos equipamentos de soldagem e dos dispositivos de medição. Este fator foi proposto porque foram observadas variações no fluxo de gás de plasma da ordem de 0,03 l/min. e de 5 A na corrente de soldagem durante a realização dos testes. Além disto, a verificação deste fator foi motivada pela dificuldade citada no trabalho de Garcia & Norrish (1995) na reprodução de condições utilizadas em trabalhos anteriores devido, principalmente, às diferenças nos equipamentos de soldagem.
- b) Limpeza do corpo de prova: Resquícios de impurezas e sujeiras (fluido de corte) presentes no corpo de prova devido a um processo inadequado de limpeza após a sua usinagem

poderiam reagir com o metal líquido da poça de fusão e alterar as forças de tensão superficial, gerando instabilidade no “keyhole” e conseqüente irregularidade no cordão de solda.

- c) Desvios na dimensão da face da raiz (nariz) da junta: A instabilidade dos resultados pode ter sido motivada por erros de fabricação dos corpos de prova, que apresentavam desvios na dimensão da face da raiz da junta. Este tipo de erro pode resultar em alterações no equilíbrio das forças que atuam sobre a poça de fusão e, desta forma, em instabilidade na manutenção do “keyhole”. Segundo Quintino et al. (1992), a força que atua sobre a poça de fusão devido à pressão gravitacional é função da altura da coluna líquida da poça que, neste caso, está relacionada com a face da raiz da junta. Esta força atua no sentido de fechar o “keyhole”. Desta maneira, valores menores e maiores do que o valor de referência podem resultar em penetração excessiva ou falta de penetração, respectivamente, para uma certa condição de soldagem.
- d) Recuo excessivo do eletrodo: Em todas as soldas o valor do recuo do eletrodo foi mantido em 2,35 mm, que é próximo do valor máximo recomendado pelo fabricante (2,36 mm). Esta situação pode representar uma condição extrema, que pode introduzir instabilidade no “keyhole” durante a soldagem.
- e) Tipo de gás de proteção: A instabilidade do processo pode estar ligada ao tipo do gás de proteção utilizado. A porcentagem de CO₂ na mistura do gás de proteção pode estar muito alta e de alguma forma, estar provocando reações na poça de fusão no sentido de induzir o seu colapso. Martikainen & Moisio (1993) citam que a utilização de uma mistura de argônio com alta porcentagem de CO₂ como gás de proteção pode resultar, em alguns casos, em superaquecimento e distúrbios na poça de fusão, gerando cordões de solda irregulares.

Os fatores propostos para justificar a falta de repetibilidade dos cordões de solda nas condições do envelope operacional serão estudados no próximo item. A seqüência em que o estudo de cada um dos fatores será conduzido seguirá a ordem em que estes foram dispostos, começando pela letra (a) e finalizando pela letra (e).

5.5- Verificação da instabilidade do envelope operacional

5.5.1- Confiabilidade dos equipamentos de soldagem

Para se determinar qual a causa provável da não validação do envelope operacional definido no item 5.3, testes foram conduzidos para a avaliação dos fatores propostos no item 5.4. O primeiro fator que foi analisado diz respeito aos equipamentos de soldagem e dispositivos de regulagem de vazão de gás de plasma. Para a verificação destes fatores, 3 soldas foram executadas em uma junta reta de topo confeccionada a partir de chapas de aço carbono (ABNT 1020) de 4,8 mm de espessura. A preferência pela configuração de junta reta em relação à junta em V tem dois motivos. O primeiro pela maior facilidade de preparação e de ajuste dos parâmetros de soldagem e o segundo devido ao fato da junta em V não estar proporcionando repetibilidade de resultados.

Após 10 ensaios, a condição de soldagem para a junta reta de topo foi definida. A condição selecionada não constituiu um ajuste ideal para a soldagem mas, poderia ser utilizada para a avaliação da confiabilidade dos equipamentos de soldagem e dos dispositivos de controle. Os parâmetros de soldagem selecionados foram:

Corrente: 140 A

Gás de proteção: Argônio + 25% CO₂

Vazão de gás de proteção: 4,5 l/min.

Diâmetro do orifício constritor: 2,8 mm

Ângulo de ponta do eletrodo: 60°

Espessura da chapa: 4,8 mm

Gás de plasma: Argônio

Vazão de gás de plasma: 1,1 l/min.

Velocidade de soldagem: 19 cm/min.

Diâmetro do eletrodo: 4,8 mm

Configuração da junta: Junta reta de topo

Foram realizados três testes com a condição acima descrita. Durante a realização de cada um dos testes, foi feita a observação da variação do fluxo de gás de plasma. Para melhorar as condições de nitidez desta verificação, foi utilizada uma câmera de vídeo, que filmava a variação do gás de plasma medida no rotâmetro. O sinal de vídeo foi gravado em videocassete. Foi verificado também o comportamento da corrente e da tensão de soldagem para cada um dos testes realizados através do sistema de aquisição de dados.

As imagens mostraram que durante a soldagem houve uma variação de aproximadamente 0,03 l/min. na vazão de gás de plasma, semelhante ao ocorrido na soldagem da junta em V (testes da Tabela 5.3). Entretanto, os resultados de soldagem se mantiveram os mesmos nos três testes. O cordão de solda se apresentou da mesma forma em todos os testes realizados, mostrando haver repetibilidade para esta condição de soldagem. A princípio, os resultados sugerem que o fato de não haver repetibilidade na soldagem da junta em V provavelmente não se deve à variação do fluxo de gás de plasma observada.

A Figura 5.6 mostra um exemplo típico do comportamento observado para a corrente de soldagem durante a realização de um dos testes da Tabela 5.3, realizado com a condição 2 definida no item 5.4. Nesta figura pode-se notar que ocorre uma variação de aproximadamente 5 A na corrente de soldagem a partir do valor de referência ajustado na fonte. O comportamento da tensão de soldagem seria uma consequência da variação observada na corrente de soldagem e é mostrado na Figura 5.7. Em todos os casos, o mesmo comportamento mostrado nas Figuras 5.6 e 5.7 foram observados nos testes deste item (5.5.1), mostrando que isto ocorre também para diferentes ajustes de corrente de soldagem e tipos de junta, ou seja, é uma questão de funcionamento da fonte. Deste modo, não se pode afirmar que exista uma relação entre esta variação na corrente de soldagem e a irregularidade no cordão de solda.

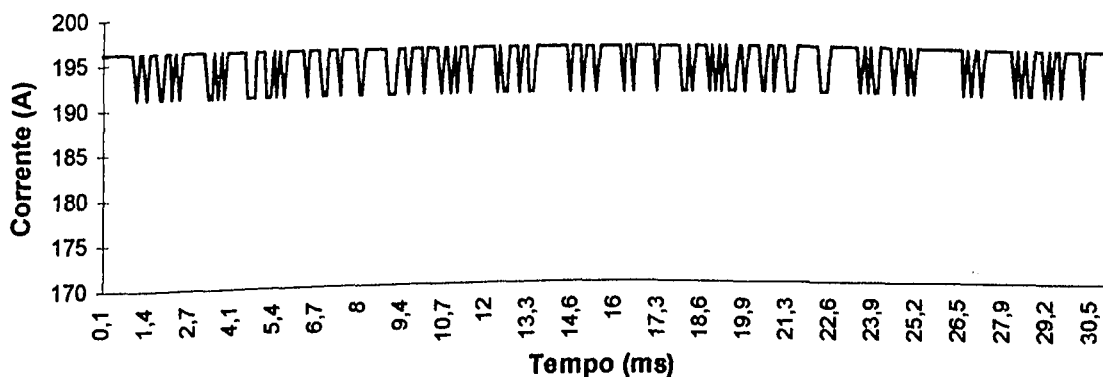


FIGURA 5.6: Comportamento da corrente durante a soldagem.

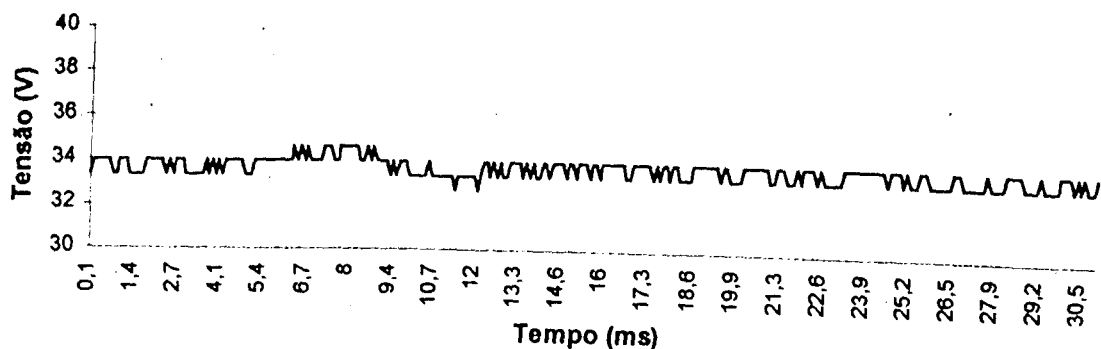


FIGURA 5.7: Comportamento da tensão durante a soldagem.

5.5.2- Limpeza do corpo de prova

Na literatura, existe alguma controvérsia quanto a presença de óxido ou sujeira na junta a ser soldada. Segundo a AWS (1991a), as características do processo de soldagem por plasma o tornam, de certa forma, bastante tolerante quanto ao tratamento de limpeza das peças a soldar. Entretanto, Walsh & Nunes (1989) mostraram que a presença de óxidos, principalmente os que contém oxigênio, podem aumentar consideravelmente a energia transferida para a poça, gerando o aumento da tensão de soldagem e acarretando assimetria na poça de fusão.

Para este estudo foram preparados 5 corpos de prova, conforme a configuração original da junta proposta por este trabalho (Figura 3.6). Após a preparação dos corpos de prova, três destes foram limados na região da junta para a retirada das marcas de usinagem da face da raiz que poderiam ser consideradas como pontos de acúmulo de sujeira. Posteriormente os corpos de prova foram escovados com uma escova de aço e foram decapados com "thiner". Dois dos corpos de prova foram mantidos como usinados, isto é, sujos com óleo de máquina.

Os parâmetros de soldagem utilizados para a soldagem dos corpos de prova são os mesmos da condição 2 definida no item 5.4. Os resultados de soldagem obtidos com esta condição são apresentados na Tabela 5.4. A classificação dos resultados de soldagem foi a mesma considerada anteriormente (Tabela 5.3). A variação da vazão do gás de plasma também foi verificada, utilizando a câmera e o videocassete.

TABELA 5.4: Resultados dos testes feitos para a verificação da influência do processo de limpeza dos corpos de prova sobre a repetibilidade dos resultados.

Teste	Condição de limpeza	Resultado de soldagem	Variação no fluxo de gás de plasma (l/min)
1	Limpo	Adequada	0,03
2	Limpo	Adequada	0,03
3	Limpo	Adequada	0,04
4	Sujo com óleo	Adequada	0,03
5	Sujo com óleo	Adequada	0,03

Os resultados de soldagem tanto dos corpos de prova limpos como dos corpos de prova impregnados com óleo foram os mesmos. Em todos os testes da Tabela 5.4 foi obtida uma penetração adequada, embora todos tenham apresentado pequenas irregularidades no cordão de solda. Estas irregularidades observadas foram provocadas pelo colapso do “keyhole” em alguns pontos ao longo do cordão de solda. A variação no fluxo de gás de plasma se manteve praticamente constante durante a soldagem e oscilou em torno de 0,03 l/min..

Apesar do aparecimento de pequenas irregularidades no cordão de solda, não se pode afirmar que o fator limpeza do corpo de prova agiu de forma negativa sobre a estabilidade do processo de soldagem. Estes resultados apresentam uma relação com o trabalho da AWS (1991a), que indica que o processo PAW é bastante tolerante com relação às impurezas presentes nas peças a soldar. Entretanto, não se pode descartar a possibilidade deste fator estar atuando juntamente com outros fatores para a geração de instabilidade na manutenção do “keyhole”.

5.5.3- Desvios de dimensão na face da raiz (nariz) da junta

Após a fabricação dos corpos de prova, foram verificados desvios na dimensão da face da raiz da junta. Os desvios observados foram provenientes de um controle inadequado no processo de fabricação. Esta variação na face da raiz está diretamente ligada com a quantidade de material de base que deverá ser fundida para que o arco possa gerar o orifício do “keyhole”. Dentro deste aspecto, pode-se supor que quanto menor for a medida da face da raiz da junta, maior será a possibilidade do arco gerar uma situação de penetração excessiva e

quanto maior for esta medida da face da raiz da junta, maior a possibilidade de se obter uma condição de falta de penetração.

Segundo Lucas (1978), é através da técnica "keyhole" de soldagem que as vantagens do processo PAW ficam bem evidentes, podendo-se soldar chapas com até 6,0 mm de espessura sem a preparação dos cantos. Esta afirmação demonstra haver uma certa tolerância em relação a certos desvios nessa espessura, uma vez que as chapas geralmente são produzidas via laminação, o que gera bordos arredondados, não garantindo precisão dimensional na face da raiz da junta. Garcia & Norrish (1995) também citam que a utilização do processo PAW permite maiores tolerâncias em termos de variações na preparação de juntas. Para Pinfold & Jubb (1973a) existem vários argumentos sobre a precisão requerida na preparação dos bordos da junta, embora a qualidade final da solda seja melhor quando bordos usinados são utilizados, é possível obter o "keyhole" com bordos preparados via oxicorte.

Por outro lado, Martikainen & Moisis (1993) afirmam que as tolerâncias de preparação de juntas para o processo de soldagem por plasma através da técnica "keyhole" são menores do que as tolerâncias utilizadas para o processo GTAW. Isto demonstra que deve haver um certo cuidado em relação ao controle dimensional de preparação de juntas para garantir a qualidade das soldas.

Visando o estudo deste fator, 10 corpos de prova foram confeccionados e a face da raiz da junta de cada um destes foi medida com auxílio de um microscópio ferramenteiro, cuja resolução da mesa de coordenadas é de 0,001 mm. A soldagem destes corpos de prova permitiu que fosse verificada a tolerância do processo de soldagem à pequenas variações na face da raiz da junta. Para complementar o estudo do efeito da variação da quantidade de material a ser fundido na região da junta, 6 dos corpos de prova foram confeccionados com diferentes ângulos de chanfro, sendo estes de 60° , 120° e 160° . Estas modificações em relação ao ângulo de chanfro do corpo de prova padrão, que é de 90° , determinam o mesmo efeito de variação da quantidade de material de base a fundir, só que mais acentuado.

A Tabela 5.5 mostra os resultados obtidos com a variação da face da raiz da junta e do ângulo de chanfro. A condição de soldagem utilizada em todos os testes foi a condição 2 definida no item 5.4.

TABELA 5.5: Resultados dos testes feitos para a verificação da influência da variação dimensional dos corpos de prova sobre a estabilidade do cordão de solda.

Teste	Ângulo de chanfro	Face da raiz da junta (mm)	Resultado (penetração)
1	90 ⁰	4,53	Excessiva
2	90 ⁰	5,16	Adequada
3	90 ⁰	5,19	Adequada
4	90 ⁰	5,27	Adequada
5	60 ⁰	5,30	Incompleta
6	60 ⁰	5,09	Incompleta
7	120 ⁰	4,50	Adequada
8	120 ⁰	4,75	Adequada
9	160 ⁰	5,24	Excessiva
10	160 ⁰	5,41	Excessiva

Os resultados da Tabela 5.5 indicam haver uma certa tolerância do processo de soldagem por plasma em relação à variação da quantidade de material a fundir na região da junta, indicando uma correlação com os trabalhos de Lucas (1978), Garcia & Norrish (1995) e de Pinfold & Jubb (1973a). Os resultados obtidos com um ângulo de chanfro de 90⁰ poderiam ser considerados coerentes pois, a soldagem da junta com a menor face de raiz (teste 1 da Tabela 5.5) resultou em excesso de penetração e juntas com face de raiz de 5,16 a 5,27 mm (testes 2, 3 e 4 da Tabela 5.5) possibilitaram a soldagem pela técnica “keyhole”. Estes resultados estão, aparentemente, de acordo com a lógica do processo de soldagem.

Entretanto, a formação do “keyhole” foi conseguida também para um ângulo de chanfro de 120⁰ (testes 7 e 8 da Tabela 5.5), com faces da raiz da junta de 4,50 e 4,75 mm, que correspondem a situações mais severas em termos de redução de quantidade de material de base na região da junta do que a apresentada pela condição do teste 1 da Tabela 5.5. Deste modo, há uma indicação de que o resultado de excesso de penetração obtido no teste 1 da Tabela 5.5 poderia estar mais relacionado com uma possível instabilidade na manutenção do “keyhole”, ocasionado por outros fatores, do que devido à redução da quantidade de material na região da junta.

Os testes realizados em juntas com ângulo de chanfro de 60⁰ (testes 5 e 6 da Tabela 5.5) e com faces da raiz da junta de 5,30 e 5,09 mm resultaram em falta de penetração. Neste caso, o aumento da quantidade de material na região da junta foi bastante significativo em relação à junta com ângulo de chanfro de 90⁰, podendo contribuir para o resultado de falta de penetração.

O oposto ocorreu quando se utilizou um ângulo de chanfro de 160° (testes 9 e 10 da Tabela 5.5) e com faces da raiz da junta de 5,24 e 5,41 mm. Neste caso, o ângulo de chanfro é muito grande, resultando numa condição de soldagem de junta reta de topo. A redução de material na região da junta foi muito grande em relação às outras condições, mesmo para medidas de face da raiz relativamente altas, e o resultado de soldagem foi penetração excessiva.

Os resultados mostraram que o fato da face da raiz da junta sofrer uma pequena variação dimensional durante o processo de fabricação, não pode ser considerado como fator responsável pela não validação do envelope operacional. Entretanto, este fator pode contribuir, juntamente com os demais fatores propostos, para conduzir o processo de soldagem a uma condição em que o cordão de solda se torne irregular, principalmente no tocante às condições de soldagem próximas aos limites extremos do envelope operacional.

5.5.4- Recuo do eletrodo

O recuo do eletrodo também pode ser um fator gerador de instabilidade no processo de soldagem. Isto ocorre porque este parâmetro de soldagem está diretamente relacionado com o grau de constrição do arco. A princípio, quanto maior é o recuo do eletrodo em relação à face do bocal de constrição, mais constricto se torna o arco, o que resulta em uma maior concentração de energia e no aumento do poder de penetração do arco. A redução do recuo do eletrodo permite uma certa abertura do arco, levando a uma redução da concentração de energia do processo e na redução do poder de penetração do arco tal como mostra a Figura 5.8 (Thermal Dynamics Corporation, 1994).

A literatura do processo de soldagem por plasma recomenda que os trabalhos referentes à soldagem através da técnica “keyhole” sejam conduzidos com o recuo máximo permitido para a tocha de soldagem (Thermal Dynamics Corporation, 1994). Esta recomendação é justificada pela alta concentração de energia que é requerida para a formação do orifício do “keyhole”. Entretanto, um estudo para se determinar com maior descrição o efeito da variação do recuo do eletrodo sobre o processo de soldagem é requerido.

Para este estudo, foram conduzidos 9 testes com a condição 2 de soldagem definida no item 5.4, para um recuo do eletrodo de 2,35 mm. A Tabela 5.6 mostra os resultados destes testes. O critério utilizado para a avaliação dos cordões de solda foi o mesmo utilizado nos testes feitos a partir da Tabela 5.3 e é apresentado na Figura 3.8 do capítulo 3.

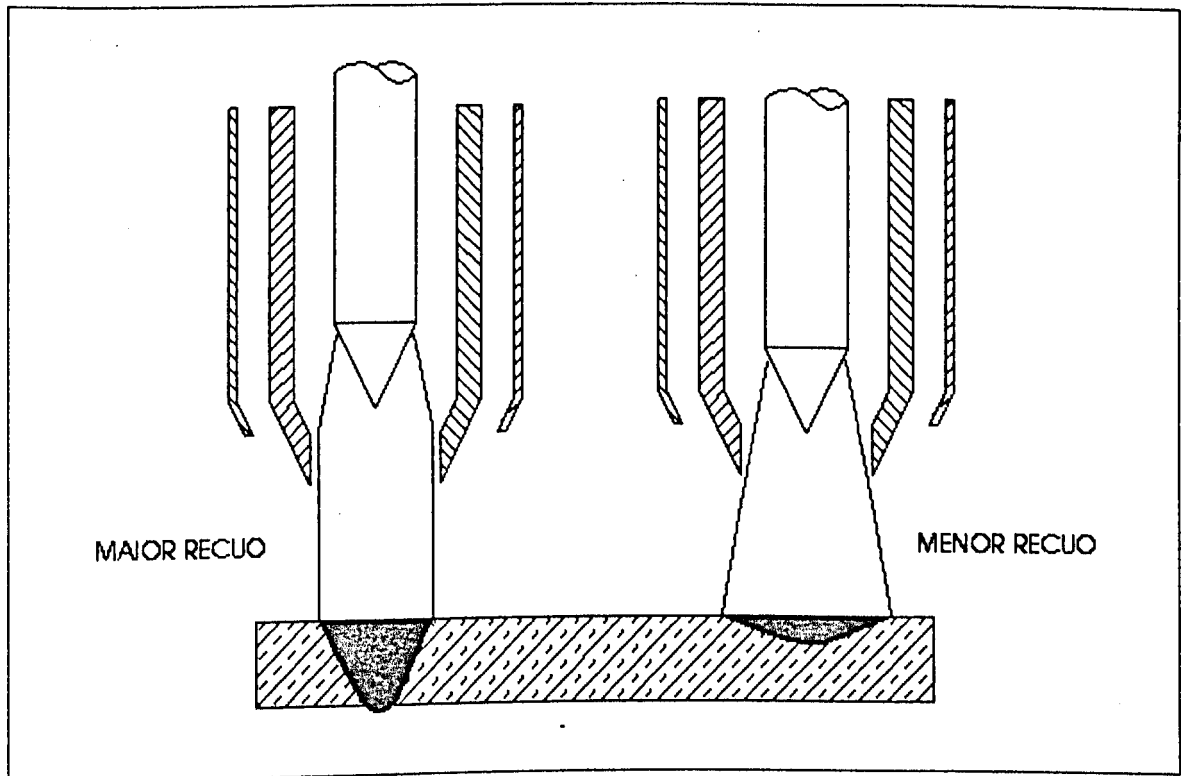


FIGURA 5.8: Efeito do recuo do eletrodo sobre o cordão de solda (Thermal Dynamics Corporation, 1994).

TABELA 5.6: Resultados dos testes feitos para a verificação da influência do recuo do eletrodo sobre o comportamento do cordão de solda.

Teste	Recuo do eletrodo (mm)	Resultado (penetração)
1	1,60	Incompleta
2	1,60	Excessiva
3	1,60	Irregular
4	1,60	Excessiva
5	1,60	Incompleta
6	1,60	Irregular
7	1,35	Não foi possível a abertura do arco piloto.
8	1,35	Incompleta
9	1,35	Incompleta

Onde:

Vazão de gás de proteção: 4,5 l/min.; Gás de plasma: argônio; Vazão de gás de plasma: 1,2 l/min.; Velocidade de soldagem: 15 cm/min.; Ângulo de ponta do eletrodo: 60°; Diâmetro do bocal: 2,8 mm; Diâmetro do eletrodo: 4,8 mm; Face da raiz: 5,0 mm; Distância tocha-peça: 6,0 mm.

Nos testes em que se utilizou um recuo do eletrodo de 1,6 mm (testes 1 a 6 da Tabela 5.6) pôde-se notar elevada instabilidade no “keyhole”. Os cordões de solda apresentaram

comportamentos bastante diferentes entre si, não evidenciando qualquer repetibilidade de resultados. A redução do recuo do eletrodo de 2,35 (original) para 1,60 mm implica em uma redução da penetração e em um cordão de solda mais largo, efeito este detalhado anteriormente. Entretanto, esta mesma alteração aumenta o efeito de obstrução da passagem do gás de plasma, de tal modo que maiores velocidades são geradas no fluxo de gás (Paula Jr, 1997). Desta forma, existem dois efeitos: o primeiro é a perda de penetração pela redução do grau de constrição e o segundo é o aumento da penetração pelo aumento da velocidade do gás de plasma na saída do bocal de constrição. Neste caso, a relação entre os dois efeitos pode ter resultado em irregularidade no cordão de solda.

Uma posterior redução do recuo de eletrodo de 1,6 para 1,35 mm (testes 7 a 9 da Tabela 5.6) resultou em uma menor penetração e no teste 7, na impossibilidade da abertura do arco piloto. Neste teste, o arco piloto era estabelecido por alguns segundos, mas este se mantinha no interior da tocha e se extinguia rapidamente. Paula Jr (1997) obteve problemas semelhantes quando estudou o efeito da variação do ângulo de ponta do eletrodo. Os seus resultados mostraram que o aumento do ângulo de ponta do eletrodo fazia com que o ponto preferencial para a abertura do arco piloto fosse deslocado gradualmente da ponta para a lateral do eletrodo. Como a lateral do eletrodo possui muitos pontos igualmente distantes do bocal de constrição, era difícil obter a tensão necessária para a abertura do arco piloto. O mesmo efeito pode ter ocorrido com a redução do recuo do eletrodo, o que impediria a abertura do arco piloto.

Nos testes 8 e 9, da Tabela 5.6, verificou-se que o efeito do aumento da velocidade do fluxo de gás de plasma foi menor do que o efeito da redução da concentração de energia, resultando em cordões de solda com penetração incompleta. Nestes testes não foi verificada a mesma dificuldade de abertura do arco piloto observada no teste 7 da Tabela 5.6. Uma descentralização da ponta do eletrodo em função do processo de afiação pode ter ajudado na formação de um ponto preferencial para a abertura do arco piloto.

Aparentemente, a redução do recuo do eletrodo tornou os resultados imprevisíveis, o que poderia ser entendido como um aumento na instabilidade do “keyhole”. Entretanto, verificou-se que, apesar do agravamento da instabilidade do “keyhole” com a redução do recuo do eletrodo, este fator não se mostrou diretamente relacionado com a sua ocorrência.

5.5.5- Tipo do gás de proteção

O tipo de gás de proteção tem uma grande influência sobre o comportamento do processo de soldagem. Conforme apresentado nos itens 2.3.2 e 2.4.4 do capítulo 2, em função das propriedades físicas do gás de proteção, haverá um maior ou menor efeito de constrição do arco e uma maior ou menor entrega térmica para a poça de fusão. Por outro lado, a composição química do gás de proteção vai determinar o tipo de reação que pode ocorrer na poça de fusão. Por exemplo, gases inertes não geram nenhum tipo de reação com o metal fundido da poça de fusão, enquanto que gases ativos, dependendo do nível de elementos ativos, vão gerar reações químicas com a poça de fusão de menor ou maior intensidade.

O gás de proteção utilizado nos ensaios até aqui realizados foi uma mistura de argônio com 25% de dióxido de carbono. O dióxido de carbono é um elemento ativo. Durante a soldagem, o dióxido de carbono vai ser dissociado em função do seu aquecimento gerado pelo arco, gerando átomos de carbono e oxigênio. Estes elementos se recombinaem na forma molecular ao atingirem as regiões mais frias da peça que está sendo soldada, liberando intensa quantidade de energia (Novozhilov, 1988). Entretanto, eles apresentam grande afinidade com o ferro e os demais elementos de liga presentes no aço, resultando em reações químicas de formação de carbonetos e óxidos que ocorrem quando estes entram em contato com a poça de fusão, que está a uma elevada temperatura (Kou, 1987).

Para verificar o efeito do tipo do gás de proteção sobre o comportamento do processo de soldagem, 17 ensaios foram realizados onde se variou o gás de proteção. Em todos os ensaios conduzidos, a condição de soldagem foi a mesma, definida pela condição 2 do item 5.4. A Tabela 5.7 mostra os resultados obtidos com a variação da composição do gases de proteção e de plasma.

O critério utilizado para classificar a penetração é o mesmo utilizado anteriormente (a partir da Tabela 5.3) e é apresentado na Figura 3.8 do capítulo 3. O aspecto e o acabamento superficial dos cordões de solda foram classificados subjetivamente em:

- Relativamente limpo e muito bom: utilizado para cordões de solda que apresentaram pequena quantidade de escória e um acabamento superficial muito bom.
- Com alguma escória e bom: utilizado para os cordões de solda que apresentaram uma quantidade relativamente alta de escória e um acabamento superficial bom.
- Limpo e muito ruim: utilizado para os cordões de solda que não apresentaram escória e o acabamento superficial se manteve muito ruim.

TABELA 5.7: Resultados dos testes feitos para verificar o efeito da variação da composição do gás de proteção e do gás de plasma no comportamento do cordão de solda.

Teste	Gás de proteção	Gás de plasma	Penetração	Aspecto e acabamento
1	Ar + 10% CO ₂	Ar	Adequada	Relativamente limpo e muito bom
2	Ar + 10% CO ₂	Ar	Adequada	Relativamente limpo e muito bom
3	Ar + 10% CO ₂	Ar	Adequada	Relativamente limpo e muito bom
4	Ar + 18% CO ₂	Ar	Adequada	Com alguma escória e bom
5	Ar + 18% CO ₂	Ar	Adequada	Com alguma escória e bom
6	Ar + 18% CO ₂	Ar	Excessiva	-
7	Ar + 5% O ₂	Ar	Adequada	Relativamente limpo e muito bom
8	Ar + 5% O ₂	Ar	Adequada	Relativamente limpo e muito bom
9	Ar + 5% O ₂	Ar	Adequada	Relativamente limpo e muito bom
10	Ar	Ar	Incompleta	Limpo e muito ruim
11	Ar	Ar	Incompleta	Limpo e muito ruim
12	Ar	Ar	Incompleta	Limpo e muito ruim
13	Ar + 5% He	Ar	Incompleta	Limpo e muito ruim
14	Ar + 5% He	Ar	Incompleta	Limpo e muito ruim
15	Ar + 25% He	Ar	Incompleta	Limpo e muito ruim
16	Ar + 25% He	Ar	Incompleta	Limpo e muito ruim
17	Ar + 25% He	Ar + 5% He	Incompleta	Limpo e muito ruim

Onde:

Corrente: 200 A; Vazão de gás de proteção: 4,5 l/min.; Vazão de gás de plasma: 1,2 l/min.; Ângulo de ponta do eletrodo: 60°; Diâmetro do bocal: 2,8 mm; Recuo do eletrodo: 2,35 mm; Diâmetro do eletrodo: 4,8 mm; Face da raiz: 5,0 mm; Distância tocha-peça: 6,0 mm.

Quando se utilizou uma mistura de argônio com 10% de dióxido de carbono (testes 1, 2 e 3 da Tabela 5.7), obteve-se condições de soldagem boas, que garantiram uma maior regularidade (repetibilidade) do cordão de solda, sem contudo, eliminar as irregularidades deste por completo (diferença no reforço da raiz da solda). O acabamento superficial das soldas foi melhor do que os das soldas realizadas com as mesmas condições de soldagem, mas com uma mistura de argônio com 25% de dióxido de carbono como gás de proteção, testes estes realizados a partir da validação do envelope operacional. A Figura 5.9 mostra o acabamento superficial obtido com esta condição de soldagem. Foi gerada uma mínima quantidade de escória sobre o cordão de solda, que se apresentou ligeiramente enegrecido.

A utilização de uma mistura de argônio com 18% de dióxido de carbono (testes 4, 5 e 6 da Tabela 5.7), para a mesma condição de soldagem, gerou uma certa instabilidade no "keyhole", evidenciada pelo resultado de penetração excessiva na junta obtido no teste 6. Em relação aos testes 1 a 3, onde se utilizou uma mistura de argônio com 10% de CO₂, estes

apresentaram um acabamento superficial ligeiramente pior e uma maior quantidade de escória em função da maior quantidade de oxigênio presente na atmosfera do arco.

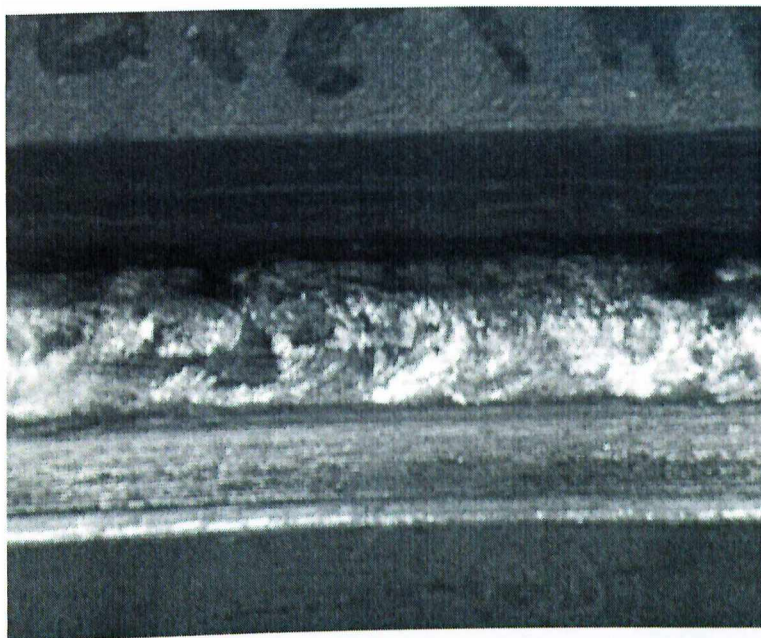


FIGURA 5.9: Acabamento superficial do cordão de solda obtido com uma atmosfera protetora de argônio com 10% de CO_2 .

Nota-se, ao se comparar os resultados dos testes 4, 5 e 6 da Tabela 5.7 com os testes da Tabela 5.3 feitos com a mesma condição de soldagem, mas utilizando uma mistura de argônio com 25% de CO_2 como gás de proteção, que os resultados são bastante parecidos. Observou-se que não houve grande diferença entre a utilização de misturas de argônio com 18% de CO_2 e com 25% de CO_2 , apresentando ambas o mesmo tipo de irregularidade no cordão de solda. Aparentemente, o aumento da porcentagem de dióxido de carbono de 10% para 18% na composição do gás de proteção introduziu maior irregularidade no cordão de solda.

A utilização de uma mistura de argônio com 5% de O_2 como gás de proteção (testes 7, 8 e 9 da Tabela 5.7) forneceu resultados semelhantes aos obtidos com a utilização do argônio com 10% de dióxido de carbono, tanto em termos de acabamento como de estabilidade do “keyhole” e regularidade do cordão de solda. O acabamento superficial da solda foi muito bom, provavelmente garantido pela ação metalúrgica do oxigênio sobre a poça de fusão no sentido de aumentar a sua molhabilidade. Entretanto, uma superfície levemente enegrecida foi gerada como efeito das reações de oxidação geradas pela presença do oxigênio no meio

protetor da poça de fusão e a quantidade de escória foi menor em relação à soldas onde se utilizou a mistura de argônio com 18% de CO₂.

Os testes em que se utilizou o argônio puro tanto para o gás de proteção como para o gás de plasma (testes 10, 11 e 12 da Tabela 5.7) apresentaram penetração incompleta e acabamento superficial muito ruim. O acabamento superficial obtido nestas condições é mostrado na Figura 5.10. A redução da penetração em relação aos testes anteriores ocorreu pela redução da quantidade de calor transferido à peça. A baixa condutividade térmica do argônio e a redução da concentração de energia pela ocorrência de uma ionização parcial do gás de proteção, que provoca o aumento da área de incidência do arco sobre a peça, são as principais causas da falta de penetração na solda. Este efeito foi verificado e estudado no trabalho de Martinez et al. (1994).



FIGURA 5.10: Acabamento superficial do cordão de solda obtido com uma atmosfera protetora de argônio puro.

Com relação ao acabamento superficial das soldas conduzidas com argônio como gás de plasma e de proteção, este se manteve ruim em todos os casos. Basicamente, isto ocorreu em função da intensa agitação da poça de fusão pelo retorno dos gases à superfície da solda, que ocorre quando não é formado o orifício do “keyhole”. A redução da molhabilidade da poça de fusão em virtude da menor taxa de transferência de calor promovida pelo argônio também tem uma parcela de influência sobre o mau acabamento superficial das soldas.

Martikainen & Moision (1993) mostraram que a utilização do argônio tanto como gás de proteção como gás de plasma não fornecem boas condições para a soldagem de aços com juntas chanfradas. Segundo estes autores, esta condição promove a subida da poça de fusão pelas laterais do chanfro, não permitindo o correto preenchimento da junta.

Os testes conduzidos em uma atmosfera protetora de argônio com hélio (testes 13 a 16 da Tabela 5.7) não se mostraram satisfatórios para a soldagem nestas condições. Tanto a utilização do argônio com 5% de hélio como argônio com 25% de hélio como gás de proteção geraram soldas com penetração incompleta e com péssimo acabamento superficial. Estes resultados concordam com as informações da literatura que indicam que os benefícios da adição do hélio ao argônio no gás de proteção só começam a ser sentidos a partir de uma porcentagem superior a 40% de hélio (AWS, 1991a e Martinez et al., 1994). Segundo estes autores, misturas de argônio com hélio com porcentagens de hélio inferiores a 40% comportam-se como o argônio puro. A utilização destes gases de proteção resultou em uma entrega térmica relativamente baixa para a poça de fusão, resultando em perda de penetração, falta de molhabilidade da poça de fusão e, conseqüente, na deterioração do acabamento superficial das soldas.

A utilização de uma condição com argônio com 5% de hélio como gás de plasma e argônio com 25% de hélio como gás de proteção (teste 17 da Tabela 5.7) também não trouxe melhoria no comportamento do cordão de solda em relação aos testes 10 a 13 da mesma tabela. Os benefícios da adição de hélio aos gases de proteção e de plasma não foram sentidos, reforçando a afirmação de que estes só podem ser observados efetivamente a partir de adições de, pelo menos, 40% de hélio ao argônio.

Os resultados da Tabela 5.7 mostraram que a composição química do gás de proteção tem uma influência muito grande sobre o comportamento da solda e pode estar relacionado com a irregularidade do cordão de solda. Entretanto, as irregularidades no cordão de solda não foram completamente eliminadas. Foi notado que a adição de dióxido de carbono ao argônio em até 10% ou 5% de O_2 no gás de proteção melhorou muito as condições de soldagem e o comportamento do cordão de solda se manteve bastante estável em relação a outros gases utilizados. O aumento da porcentagem de dióxido de carbono de 10% para 18% na mistura utilizada como gás de proteção pareceu afetar negativamente a estabilidade da manutenção do "keyhole", gerando uma situação de não repetibilidade de resultados.

Apesar dos esforços feitos para a eliminação da irregularidade do cordão de solda, não conseguiu-se eliminá-la por completo. Os resultados mostraram que as condições de

soldagem de uma junta em V são bastante problemáticas, marcadas por instabilidade na manutenção do “keyhole”. Esta instabilidade do “keyhole” pode ser amenizada por uma escolha adequada do gás de proteção. Os estudos indicam que a própria configuração da junta cria condições para o aparecimento de irregularidades no cordão de solda e instabilidades no “keyhole”.

6- CONCLUSÕES

A partir do estudo realizado a respeito do processo PAW, em função dos objetivos propostos para este trabalho, pôde-se concluir que:

- 1- O envelope operacional do passe de raiz de uma junta em V de aço carbono apresenta uma faixa operacional estreita em termos de corrente, velocidade de soldagem e vazão de gás de plasma, para a obtenção do “keyhole”.
- 2- A repetibilidade dos testes realizados dentro do envelope operacional não foi alcançada. Isto ocorreu em função de uma instabilidade na manutenção do “keyhole”, que causou irregularidades no cordão de solda. Verificou-se que pequenas variações nos parâmetros/variáveis de soldagem afetam significativamente a qualidade da solda.
- 3- Com relação à instabilidade na manutenção do “keyhole”, causadora da falta de repetibilidade do cordão de solda, pôde-se concluir que:
 - A causa da não repetibilidade do cordão de solda está relacionada com o tipo de junta (preparação em V) e com o tipo do gás de proteção.
 - Os melhores resultados foram obtidos com menores valores da face da raiz da junta e do diâmetro do orifício constritor da tocha.
 - Fatores relacionados com a confiabilidade dos equipamentos de soldagem, limpeza dos corpos de prova, pequenas variações dimensionais na face da raiz da junta e o recuo do eletrodo não apresentaram relação direta com a instabilidade do “keyhole”.
 - O tipo do gás de proteção apresentou influência na estabilidade do “keyhole”. Uma escolha adequada do gás de proteção permitiu reduzir as irregularidades do cordão de solda com repetibilidade.

- Misturas de argônio com até 10% de CO₂ ou com até 5% de O₂ proporcionaram melhorias no acabamento superficial das soldas e na estabilidade do “keyhole”. Aumentos na porcentagem de CO₂, a partir de 10%, resultaram em uma maior instabilidade do “keyhole”, verificada com a utilização de misturas de argônio com 18% e 25% de CO₂.
- Gases tais como o argônio puro e misturas de argônio com 5% a 25% de He apresentaram resultados semelhantes e, em relação às misturas de argônio com CO₂, proporcionaram piores acabamento superficial das soldas e estabilidade do “keyhole”.

7- PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Para complementar o estudo realizado a partir deste trabalho, propõe-se alguns assuntos de pesquisa relacionados ao processo PAW:

- 1- Elaborar um estudo sistemático a respeito da influência de diferentes combinações de composição química do gás de proteção e do gás de plasma no comportamento do processo (técnica “keyhole”) na soldagem do passe de raiz em uma junta em V. Este estudo poderia envolver gases ternários, tais como misturas de argônio, dióxido de carbono e oxigênio como gás de proteção. Os melhores resultados obtidos poderiam ser aplicados em outros tipos de junta (reta ou em U) para efeito de comparação.
- 2- Determinar o envelope operacional na soldagem do passe de raiz de uma junta em V (técnica “keyhole”), utilizando metal de adição e verificar a sua repetibilidade. Estabelecer um comparativo com outros tipos de junta.
- 3- Realizar um estudo sistemático com planejamento estatístico do passe de raiz pela técnica “keyhole”, variando os seguintes parâmetros: o recuo do eletrodo, o ângulo de ponta e o diâmetro do eletrodo, diâmetro do orifício constritor, tipo e vazão dos gases de plasma e proteção, corrente, velocidade de soldagem, velocidade de alimentação, tipo de junta, face e abertura da raiz e ângulo da junta. Verificar, com isto, a influência destas variáveis na repetibilidade dos testes para uma junta em V.
- 4- Desenvolvimento do passe de enchimento em vários tipos de junta, através da técnica “melt-in” de soldagem, determinando o envelope operacional, os parâmetros de controle e a influência destes sobre o comportamento do cordão de solda e do processo de soldagem.
- 5- Estabelecer procedimentos de soldagem para uma gama maior de materiais com variação no tipo de junta, gás de proteção e de plasma, procurando levantar uma área maior de aplicação deste processo de soldagem.

8- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AQUINO, S. A. & DAMANET, P. Soldagem do Aço de Ultra Resistência 300 M pelo Processo Plasma. In: Anais do X Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, Vitória - ES, p. 203 - 212, 1984.

AWS - AMERICAN WELDING SOCIETY. Gas Tungsten Arc Welding e Plasma arc Welding. In: Welding Handbook, 8th ed., v. 2, p. 73 - 107 e 329 - 350, 1991a.

AWS - AMERICAN WELDING SOCIETY. Physics of Welding. In: Welding Handbook, 8th ed., v. 1, p. 31 - 63, 1991b.

CAMPBELL, R. D. & LACOURSIERE, E. J. A Guide to the Use of Tungsten Electrodes for GTAW Welding. Welding Journal, p. 39 - 45, january 1995.

CERVO, A. L. & BERVIAN, P. A. Metodologia Científica. São Paulo, Ed. McGraw-Hill do Brasil, 156 p., 1972.

CRAIG, E. The Plasma Arc Process - A Review. Welding Journal, p. 19 - 25, february 1988.

DUTRA, J. C. & MARQUEZE, C. M. Estudo do Processo Micro - Plasma Concernente à Influência das Variáveis Sobre a Geometria da Solda. In: Anais do XIX Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, Águas de São Pedro - SP, p. 469 - 478, 1993.

EVANS, D. M.; HUANG, D.; MCCLURE, J.C.; NUNES JR. A. C. Arc Efficiency of Plasma Arc Welding. Welding Research Supplement, In: Welding Journal, p. 53s - 58s, February 1998.

GARCIA, J. A. O. & NORRISH, J. Soldagem de Liga de Alumínio-Lítio por Arco Plasma com Variador de Polaridade. In: Anais do XXI Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, Caxias do Sul - RS, p. 401 - 416, 1995.

HOFFMEISTER, H.; HUISMANN, G.; SOMMER, U.; KNAGENHJELM, H. O. Operational Parameter Fields in Hyperbaric Plasma Keyhole Welding of Mild Steel Line Pipe. *Materials Engineering*, v. 3, p. 125 - 131, 1996.

HOU, R.; EVANS, D. M.; MCCLURE, J. C.; NUNES JR, A. C.; GARCIA, G. Shielding Gas and Heat Transfer Efficiency in Plasma Arc Welding. *Welding Research Supplement*. In: *Welding Journal*, p. 305s - 310s, october 1996.

HOULDCROFT, P. & JOHN, R. TIG and Plasma Process e Welding Productivity. In: *Welding and Cutting*, Ed. Woodhead-Faulkner, p. 136 - 154 e 195 - 201, 1988.

HUNT, C.; BOLS, I.; ORTEGA, P. Helium - a Lightweight Gas but a Heavyweight Performer. *Welding & Metal Fabrication*, p. 10 - 14, june 1997.

KEANINI, R. G. & RUBINSKY, B. Three-Dimensional Simulation of the Plasma Arc Welding Process. *International Journal of Heat Mass Transfer*, p. 3283 - 3297, November 1992.

KIM, C. J.; KAUH, S.; RO, S. T.; LEE, J. S. Parametric Study of the Two-Dimensional Keyhole Model for High Power Density Welding Processes. *Journal of Heat Transfer*, v. 166, p. 209 - 214, February 1994.

KOU, S. Fusion Welding Processes e Chemical Reactions in the Welding Zone. In: *Welding Metallurgy*, John Wiley & Sons, Inc., p.3 - 27 e 61 - 89, 1987.

LIEBISCH, H. Microplasma Welding - New and Useful. *Welding Design & Fabrication*, p. 73 - 75, October 1978.

LUCAS, W. TIG and Plasma Welding. England, Abington Publishing, 52 p., 1978.

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 Research Supplement*. In: *Welding Journal*, p. 330s - 340s, july 1993.

- MARTINEZ, L. F.; MATLOCK, C.; MARQUES, R. E.; MCCLURE, J. C.; NUNES JR, A. C. Effect of Weld Gases on Melt Zone Size in VPPA Welding of Al 2219. *Welding Journal*, p.51 - 55, october 1994.
- MARTINEZ, L. F.; MCCLURE, J. C.; NUNES JR, A. C. The Effect of Weld Gas Flow Rate on AL-Li Weldability. *Journal of Engineering for Industry*, v. 115, p. 263 - 266, August 1993.
- MIYAZAKI, T.; YOSHIOKA, S.; KIMURA, T.; KOMATSU, A.; KINOSHITA, N. Surface Modification of Steel by a Small-Diameter Plasma Arc. *Annals of the CIRP*, v. 44/1, p. 161 - 164, 1995.
- MODENESI, P. J. Influências Metalúrgicas do Fluxo de Calor. In: *Apostila de Metalurgia da Soldagem*. Belo Horizonte - MG, p. 85 - 134, 1985.
- NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. Planejamento e otimização de experimentos, Ed. da Unicamp, 299 p., 1995.
- NOVOZHILOV, N. M. Effect of Shielding Gases on the Welding Process. In: *Fundamental Metallurgy of Gas-Shielded Arc Welding*, Gordon and Breach Science Publishers, p. 51 - 66, 1988.
- ONSOIEN, M.; PETERS, R.; OLSON, D. L.; LIU, S. Effect of Hydrogen in na Argon GTAW Shielding Gas: Arc Characteristics and Bead Morphology. *Welding Research Supplement*. In: *Welding Journal*, p.10s - 15s, january 1995.
- OXIGÊNIO DO BRASIL S/A. Catálogo de equipamentos e consumíveis para soldagem, 20 p, 199-.
- PANG, Q.; PANG, T.; MCCLURE, J. C.; NUNES JR, A. C. Spectroscopic Measurements of Hydrogen and Oxygen in Shielding Gas During Plasma Arc Welding. *Journal of Engineering for industry*, v. 115, p. 145 - 148, 1993.

- PANG, Q.; PANG, T.; MCCLURE, J. C.; NUNES JR, A. C. Workpiece Cleaning During Variable Polarity Plasma Arc Welding of Aluminum. *Journal of Engineering for Industry*, v. 116, p. 463 - 466, 1994.
- PAULA JR, O. S. Desenvolvimento e Aplicação da Soldagem Plasma pela Técnica Keyhole, *Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil*, 107 p, 1997.
- PINFOLD, B. E. & JUBB, J. E. M. Plasma-Arc Welding - Part 1: Introduction. *Welding and Metal Fabrication*, p. 391 - 393, 1973a.
- PINFOLD, B. E. & JUBB, J. E. M. Plasma-Arc Welding - Part 2: Process Terminology. *Welding and Metal Fabrication*, p. 422 - 424, December 1973b.
- PINFOLD, B. E. & JUBB, J. E. M. Plasma-Arc Welding - Part 3: Secondary Control Factors. *Welding and Metal Fabrication*, p. 65 - 67, February 1974a.
- PINFOLD, B. E. & JUBB, J. E. M. Plasma-Arc Welding - Part 5: Welding Problems. *Welding and Metal Fabrication*, p. 219 - 222, June 1974b.
- PINFOLD, B. E. & JUBB, J. E. M. Plasma-Arc Welding - Part 6: Pulsed Plasma Keyhole Welding. *Welding and Metal Fabrication*, p. 263 - 265, July-August 1974c.
- QUINTINO, L.; GONÇALVES, V.; ANTUNES, F. Automatização de Soldadura de Tubos pelo Processo Plasma - "Key-Hole". In: *Anais do XVIII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, Rio de Janeiro - RJ*, p. 473 - 492, 1992.
- SANTOS, J. F. O. & QUINTINO, L. Soldadura por Plasma. In: *Processos de Soldadura*, v.1, p.273 - 292, 1993.
- SHAW JR, C. B. Effect of Orifice Geometry in Plasma-Arc Welding of Ti-6Al-4V. *Welding Research Supplement*. In: *Welding Journal*, p. 121s - 125s, April 1980.

THERMAL DYNAMICS CORPORATION, INC. Manual Instruction N° 0-2031: PWM 300 Welding Torch. West Lebanon, New Hampshire, USA, 24 p., 1994.

TORRES, M. R.; MACCLURE, J. C.; NUNES JR, A. C.; GUREVITCH, A. C. Gas Contamination Effects in Variable Polarity Plasma Arc Welded Aluminum. Welding Research Supplement. In: Welding Journal, p. 123s - 131s, april 1992.

URMSTON, S. Quality - All Things to All Welders?. Welding & Metal Fabrication, p.150 - 152, april 1996.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H.; RELA, P. R. Processo de Soldagem com Plasma. In: Soldagem: Processos e Metalurgia. Ed. Edgard Blücher, p. 157 - 179, 1992.

WALSH, D. W. & NUNES JR, A. C. Keyhole Flow Phenomena in VPPA Weldments. Proceedings of the 2nd International Conference on Trends in Welding Science and Technology, ASM International, Gatlinburg, Tennessee, USA, p. 501 - 505, 14 - 18 May 1989.

WEYMUELLER, C. R. Welding the Austenitic Stainless Steels. Welding Design & Fabrication, p.82 - 86, june 1978.

YOSHIOKA, S.; MIYAZAKI, T.; KIMURA, T.; KOMATSU, A.; KINOSHITA, N. Thin - Plate Welding by a High - Power Density Small Diameter Plasma Arc. Annals of the CIRP, v. 42/1, p. 215 - 218, 1993.

YOUNG, B. Shielding and Purging Gases: Making the Right Selection. Welding Journal, p. 47 - 50, january 1995.

FU-00011890-0