**RUHAM PABLO REIS**

# SOLDAGEM PLASMA “MELT-IN” DE AÇO COMUM AO CARBONO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2005

RUHAM PABLO REIS

# SOLDAGEM PLASMA “MELT-IN” DE AÇO COMUM AO CARBONO

**Dissertação** apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Américo Scotti

**UBERLÂNDIA - MG**

**2005**

**FICHA CATALOGRÁFICA**

Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UFU / Setor de Catalogação e Classificação

R375s Reis, Ruham Pablo, 1979-
Soldagem plasma “Melt-in” de aço comum ao carbono / Ruham Pablo Reis. - Uberlândia, 2005.
179f. : il.
Orientador: Américo Scotti.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.
1. Soldagem - Teses. 2. Plasma (Gases ionizados) - Teses. 3. Engenharia mecânica - Teses. I. Scotti, Américo. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenhanharia Mecânica. III. Título.

621.791(043.3)

Aos meus pais, Omar e Diva.

Ao meu irmão, Ramon.

## Agradecimentos

A Deus pela vida que tenho e por todas as oportunidades que tem me concedido, dentre tantas, a de realizar este trabalho;

De modo especial ao Prof. Américo Scotti pela orientação, ensinamentos e profissionalismo demonstrado em todas as situações;

A todos os colegas do curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFU. Em especial a André Richetti e Carlos Eduardo (Duda) pela grande ajuda;

A todos os amigos do LAPROSOLDA/UFU pelas informações, sugestões e apoio. De maneira especial aos alunos de iniciação científica Flávio Scarambone, Francisco Novaes e Ricardo Paschoalin;

Ao Prof. Valtair Ferraresi pela amizade e apoio demonstrados nestes anos de trabalho;

Ao técnico Lázaro Henrique pela ajuda no desenvolvimento dos dispositivos utilizados neste trabalho;

Ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFU, pela oportunidade de realização deste trabalho, em especial, aos Profs. Valder Steffen Júnior e Márcio Bacci e a secretária Ivanilda;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro;

À White Martins Gases Industrias SA pela doação dos gases de soldagem e chapas de teste;

Por fim, fica minha eterna gratidão a meus pais e irmão por todo apoio, incentivo, carinho e ajuda que me deram e têm me dado durante todo instante de vida.

# Sumário

Simbologia ..... xii
Resumo ..... xiii
Abstract ..... xiv

***Capítulo I***
**Introdução** ..... 1
***Capítulo II***
**Revisão Bibliográfica** ..... 3
2.1 Aplicabilidade ..... 4
2.2 Tipos de junta ..... 5
2.3 Gases ..... 5
2.3.1 Gás de plasma ..... 6
2.3.2 Gás de proteção ..... 7
2.4 Efeito dos gases de soldagem sobre a geometria do cordão ..... 8
2.5 Seleção dos parâmetros de soldagem ..... 8
2.6 Efeito dos parâmetros de soldagem sobre a geometria do cordão ..... 10
2.7 Instabilidades da poça de fusão ..... 13
2.8 Efeito dos parâmetros de soldagem nas propriedades mecânicas da junta ..... 17
***Capítulo III***
**Montagem Experimental, Calibrações e Ensaios Preliminares** ..... 19
3.1. Objetivo ..... 19
3.2 Metodologia utilizada ..... 19
3.2.1 Montagem da bancada ..... 19
3.2.2 Calibração da Mesa de Coordenadas ..... 20
3.2.3 Calibração do medidor de vazão para o gás de proteção ..... 21
3.2.4 Calibração do medidor/controlador de vazão para o gás de plasma ..... 22
3.3 Soldagem dos corpos de prova e avaliação dos resultados ..... 23
3.3.1 Determinação de uma faixa de velocidade de soldagem ..... 24
3.3.2 Planejamento experimental para estudo dos efeitos dos parâmetros ..... 25
3.3.3 Verificação da influência da velocidade e da corrente de soldagem 26
3.3.4 Avaliação de outros parâmetros sobre a não repetibilidade dos resultados 28
3.4 Discussão e conclusões preliminares ..... 33

*Capítulo IV*

**Estudo da Irregularidade dos Cordões** ..... 35

4.1 Objetivo ..... 35

4.2 Procedimento Experimental ..... 35

4.2.1 Influência do uso da mistura A50 comercial como gás de plasma ..... 35

4.2.2 Influência do uso de gás de purga ..... 38

4.2.3 Influência do ângulo de inclinação da tocha de soldagem ..... 38

4.2.4 Influência do material de base ..... 41

4.2.5 Influência da limpeza e da forma de união das juntas ..... 42

4.2.6 Otimização do programa de movimento da mesa de coordenadas ..... 43

4.3 Conclusões ..... 61

*Capítulo V*

**Determinação de Condições Padrão para Juntas em Aresta** ..... 45

5.1 Objetivo ..... 45

5.2 Procedimento Experimental ..... 45

5.2.1 Limites de velocidade de soldagem para as correntes propostas ..... 45

5.2.2 Verificação da dificuldade de acendimento do arco ..... 50

5.3 Conclusões ..... 51

*Capítulo VI*

**Determinação de Condições Padrão para Juntas Sobrepostas** ..... 53

6.1 Objetivo ..... 53

6.2 Soldagem dos corpos de prova e avaliação dos resultados ..... 53

6.2.1 Determinação de uma faixa de velocidade de soldagem ..... 54

6.2.2 Limites de velocidade para correntes de 145, 155 e 165 A ..... 59

6.3 Conclusão ..... 60

*Capítulo VII*

**Determinação de Condições Padrão para Juntas de Topo** ..... 63

7.1 Objetivo ..... 63

7.2 Soldagem dos corpos de prova e avaliação dos resultados ..... 63

7.2.1 Determinação de uma faixa de velocidade de soldagem ..... 64

7.3 Conclusões ..... 66

*Capítulo VIII*

**Avaliação do Desempenho de Misturas Gasosas a Base de Argônio** ..... 67

8.1 Introdução ..... 67

8.2 Soldagem dos corpos de prova e avaliação dos resultados ..... 67
8.2.1 Utilização do misturador e do programa “ROTO BR.xls” ..... 67
8.2.2 Verificação do efeito da mistura gasosa B50 ..... 69
8.2.3 Verificação do efeito da mistura gasosa B25 ..... 70
8.2.4 Verificação da repetibilidade da condição padrão ..... 70
8.2.5 Reavaliação do efeito da mistura gasosa B25 ..... 71
8.2.6 Verificação do efeito da mistura A25B25 ..... 72
8.2.7 Verificação do efeito da mistura A25 ..... 73
8.2.8 Efeito de misturas compostas por Ar e diferentes teores do aditivo A .... 74
8.2.9 Reavaliação do efeito da mistura A50 comercial ..... 78
8.2.10 Efeito das mistura compostas por Ar e teores crescentes de A e B ..... 79
8.3 Conclusões ..... 83

***Capítulo IX***

**Influência da Proteção Gasosa Adicional, da Corrente Pulsada e do Equipamento** 85
9.1 Introdução ..... 85
9.2 Soldagem dos corpos de prova e avaliação dos resultados ..... 85
9.2.1 Influência da proteção gasosa na parte posterior da poça de fusão ..... 85
9.2.2 Influência da utilização da corrente pulsada ..... 87
9.2.3 Estudo dos efeitos da corrente pulsada ..... 88
9.2.4 Influência de outro equipamento comercial de soldagem ..... 89
9.3 Conclusões ..... 91

***Capítulo X***

**Modificações no Misturador** ..... 93
10.1 Introdução ..... 93
10.2 Soldagem dos corpos de prova e avaliação dos resultados ..... 93
10.2.1 Modificações no misturador de gás ..... 93
10.2.2 Confirmação da eficiência do misturador ..... 94
10.2.3 Calibração da vazão fornecida pelo misturador ..... 95
10.3 Conclusões ..... 96

***Capítulo XI***

**Avaliação Final das Combinações de Argônio com Aditivo A** ..... 99
11.1 Objetivo ..... 99
11.2 Soldagem dos corpos de prova e avaliação dos resultados ..... 99
11.2.1 Influência da combinação Mistura A50 comercial e Argônio ..... 99
11.2.2 Confirmação do efeito do aditivo A no desempenho da soldagem ..... 102

11.3 Conclusões ..... 105

*Capítulo XII*

**Soldagem de Juntas em Aresta por Plasma, TIG e MIG/MAG** ..... 107

12.1. Objetivo ..... 107

12.2 Soldagem dos corpos de prova e avaliação dos resultados ..... 107

12.2.1 Soldagem TIG ..... 107

12.2.2 Soldagem MIG/MAG ..... 110

12.2.3 Variação da distância tocha-peça ..... 114

12.3 Conclusões ..... 115

*Capítulo XIII*

**Avaliação Metalúrgica e Mecânica de Juntas Soldadas com Aditivo A** ..... 117

13.1. Objetivo ..... 117

13.2 Procedimento Experimental ..... 117

13.2.1 Amostras para micrografia e microdureza ..... 117

13.2.2 Ensaio de tração ..... 121

13.2.3 Ensaio de estampabilidade (improvisado) ..... 124

13.3 Conclusões ..... 126

*Capítulo XIV*

**Soldagem de Juntas em Aresta com Chapas de 1 e 2 mm** ..... 127

14.1 Objetivos ..... 127

14.2 Soldagem dos corpos de prova e avaliação dos resultados ..... 127

14.2.1 Soldagem de juntas em aresta com chapas de 2 mm ..... 127

14.2.2 Soldagem de juntas em aresta com chapas de 1 mm ..... 129

14.2.3 Reavaliação da soldabilidade de juntas de topo e sobreposta ..... 133

14.3 Conclusões ..... 135

*Capítulo XV*

**Avaliação das Misturas de Argônio com Aditivos A e C** ..... 137

15.1 Objetivo ..... 137

15.2 Soldagem dos corpos de prova e avaliação dos resultados ..... 137

15.2.1 Avaliação da mistura C50 ..... 137

15.2.2 Avaliação da mistura A50C50 ..... 138

15.2.3 Avaliação da mistura A100C50 ..... 139

15.3 Conclusão ..... 140

*Capítulo XVI*

**Tolerância de Montagem para Juntas em Aresta e de Topo** ..... 141

16.1 Objetivo ..... 141
16.2 Soldagem dos corpos de prova e avaliação dos resultados ..... 141
16.2.1 Tolerância de montagem para juntas em aresta ..... 141
16.2.2 Tolerância de montagem para juntas de topo ..... 144
16.3 Conclusão ..... 147
***Capítulo XVII***
**Soldagem de Juntas de Topo e Sobreposta por Plasma, TIG e MIG/MAG** ..... 149
17.1 Objetivo ..... 149
17.2 Soldagem dos corpos de prova e avaliação dos resultados ..... 149
17.2.1 Avaliação do processo de soldagem MIG/MAG para juntas de topo .... 149
17.2.2 Avaliação do processo de soldagem MIG/MAG para juntas sobrepostas 151
17.2.3 Avaliação do processo de soldagem TIG para juntas de topo ..... 155
17.2.4 Avaliação do processo de soldagem TIG para juntas sobrepostas ..... 157
17.3 Conclusões ..... 160
***Capítulo XVIII***
**Influência do Gás de Plasma no Desempenho do Eletrodo** ..... 161
18.1 Introdução ..... 161
18.2 Soldagem e avaliação dos resultados ..... 161
18.2.1 Argônio como gás de plasma e mistura A50 como proteção ..... 162
18.2.2 Mistura A50 como gás de plasma e proteção ..... 164
18.3 Conclusões ..... 167
***Capítulo XIX***
**Conclusões** ..... 169
***Capítulo XX***
**Propostas para trabalhos futuros** ..... 171
***Capítulo XXI***
**Referências Bibliográficas** ..... 173
**Anexo I** ..... 177

## Simbologia

ASME – American Society of Mechanical Engineers

AWS – American Welding Society

$E_{imp}$ – Energia imposta de soldagem

eV – Elétron-volt

EW-Th2– Eletrodo de tungstênio com 2% de óxido de tório

HCl – Ácido clorídrico

HV – Dureza Vickers

I – Corrente de soldagem

MB – Metal de base

MIG/MAG – Metal Inert Gas/Metal Active Gas

$R^2$ – Coeficiente de correlação

TIG – Tungsten Inert Gas

TWI – The Welding Institute

U - Tensão de arco

v – Velocidade de soldagem

Va – Velocidade de alimentação

ZAC – Zona afetada pelo calor

ZF – Zona fundida

$\eta$ – Rendimento térmico do processo

**Reis, R. P., 2005, "Soldagem Plasma 'Melt-In' de Aço Comum ao Carbono"**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

## Resumo

Com a crescente demanda do mercado por técnicas de fabricação cada vez mais competitivas, o processo de soldagem a plasma tem ganhado cada vez mais evidência no meio industrial, mas com utilização ainda restrita a países desenvolvidos. Dentre as principais barreiras que impedem a completa difusão deste processo na indústria, estão os custos de equipamento e acessórios e a falta de informações consolidadas sobre o ajuste dos parâmetros de soldagem. Não bastando estas deficiências, a versão "melt-in" do processo de soldagem a plasma, que atualmente tem sido empregada com o uso de Argônio como gás de plasma e gás de proteção, apresenta relevante limitação no valor máximo de velocidade de soldagem que se pode empregar, devido ao aparecimento de irregularidades no cordão. Diante do potencial oferecido pelo processo de soldagem a plasma, uma viabilização desta opção de fabricação pode representar um diferencial nas uniões automatizadas de juntas sobrepostas, de topo ou em arestas, com grande impacto na produtividade de manufatura de itens como autopeças, compressores de refrigeração e outros componentes para linha branca e até mesmo dos chamados "tailored blanks". Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi propor e avaliar um novo procedimento de soldagem para o processo Plasma na versão "melt-in", o que inclui a formulação original de consumíveis, que possibilitasse aumentar significativamente a velocidade de operação de uniões de chapas finas de aço de baixo carbono, apresentando ao mercado uma opção de soldagem de alta taxa de produção, sem a necessidade do uso de material de adição (solda autógena). Ao final dos testes, encontrou-se uma família de misturas gasosas com alto desempenho que possibilitam aumentar a velocidade de soldagem em mais de 400% em relação ao que tem sido obtido utilizando Argônio, sem comprometer a qualidade dos cordões e sem fragilizar a união, desde que, além do uso da mistura gasosa adequada, sejam seguidos procedimentos adequados para limpeza das juntas e posicionamento da tocha.

---

Palavras-chave: Soldagem, Plasma, "Melt-in", Gás de plasma, Gás de proteção.

**Reis, R. P., 2005, "Melt-in Plasma Welding of a Low Carbon Steel"**, M.Sc. Dissertation, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, MG.

## Abstract

As a consequence of market increasing demand for more competitive manufacturing techniques, an increasingly role has been reserved in the industrial field for the Plasma welding process, although still restricted use to more developed countries. Among the main obstacles that prevent a thorough dissemination of this process, equipment and accessories costs and lack of know-how on welding parameters setting appear. Notwithstanding these deficiencies, the melt-in version of the Plasma welding process, which is normally employed with Argon as plasma and shielding gas, presents considerable limitation in the welding speed, due to the occurrence of bead irregularities. Taking into account the Plasma welding process potential, the feasibility of this manufacture option may represent a spin-off in automate unions of overlap, groove or edge joints, with great impact in the assemble productivity of goods such as auto-parts, refrigerator compressors and other white-line components and even of the so-called tailored blanks. Thus, the aim of this work was to propose and evaluate a novel welding procedure for melt-in Plasma welding, which includes an original consumable formulation. This approach aims at a significant increase of the operational speed in low-carbon-steel thin-plate unions. The goal is to present to the market an option for a welding process with high production rate without the need of filler metal (autogenous weld). After the tests, a family of gas blends with high performance was found. It was verified that it is possible to increase the welding speed over 400% in relation to that speed obtained using Argon, without compromising the quality of the beads and weakening the joint, as long as procedures for joint cleaning and torch positioning are observed.

---

Keywords: Welding, Plasma, Melt-in, Plasma gas, Shielding gas.

# Capítulo I

## Introdução

A demanda do setor produtivo por juntas soldadas de alta qualidade e custo reduzido tem sido cada vez maior e esta tendência tem estimulado e direcionado o desenvolvimento da tecnologia da soldagem em vários aspectos. Novos processos de soldagem estão surgindo e processos anteriormente indicados para aplicações muito específicas estão sendo reavaliados, principalmente após o advento da eletrônica de potência, que disponibilizou fontes de soldagem sofisticadas a preços mais acessíveis. Essas novas opções têm contribuído significativamente para elevar os patamares de qualidade e produtividade da soldagem, produzindo resultados cada vez melhores, em particular, no que concerne aos custos de produção.

A soldagem a plasma ilustra bem essa tendência. A nova geração de equipamentos para soldagem a plasma apresenta, além de preço mais acessível, um sistema de controle mais simples e confiável. Atualmente, diante das possibilidades fornecidas pela tecnologia eletroeletrônica e com a crescente demanda do mercado por técnicas de fabricação cada vez mais competitivas, a tecnologia do processo de soldagem a plasma tem se tornado cada vez mais acessível e difundida, mas com utilização ainda restrita a aplicações específicas e em países desenvolvidos. Nestes países a soldagem a plasma tem tido uma aceitação significativa nos últimos anos para aplicações automatizadas e este processo aparece como uma alternativa promissora em relação a outros processos convencionais, como o TIG e mesmo o MIG/MAG. Mas, no entanto, apesar deste processo ser utilizado industrialmente desde os anos 60 e oferecer um grande potencial com relação à otimização do processo produtivo (devido ao relativo baixo custo para se conseguir concentração do arco), não encontra uma aplicação muito difundida no meio industrial, principalmente o nacional.

As razões que historicamente têm limitado o emprego do processo de soldagem a plasma são basicamente a falta de informações consolidadas sobre suas aplicações (materiais soldáveis e ajuste de parâmetros), a complexidade inerente ao processo, a limitada oferta de sistemas de soldagem a plasma e o custo relativamente alto destes equipamentos. Ora, tendo em vista que atualmente a oferta de equipamentos dedicados é maior (tendência de preços menores), os pontos críticos para a difusão da soldagem a plasma hoje se concentram, efetivamente, na falta de informações consolidadas sobre o ajuste dos parâmetros de soldagem e na complexidade inerente ao processo. Em outras palavras, pode-se dizer que atualmente as maiores barreiras encontradas para o uso prático da soldagem a plasma se

baseiam na pouca tradição de utilização deste processo e na exigência de melhor preparação da junta (menor tolerância). Esta pouca tradição de utilização torna-se um híbrido de causa e efeito, já que não se utiliza por não se conhecer e dominar a regulagem dos parâmetros, e não se conhece mais do processo (como se conhece dos outros processos de soldagem a arco) por não se ter experiência de utilização do mesmo. Já a exigência de menor tolerância na preparação e fixação das partes da junta direciona este processo para linhas automatizadas, forma produtiva cuja aplicação em grande escala só de deu a partir da metade dos anos 90.

Apesar deste processo ser muitas vezes associado a aplicações especiais, como a industria aeroespacial, por exemplo, entende-se que a soldagem a plasma possui um grande potencial a ser explorado, principalmente nas técnicas “melt-in” e “microplasma”. A utilização dessas versões do processo Plasma apresenta-se como uma grande oportunidade para inovar o modo de fabricação por soldagem, principalmente pelo crescente uso da automação na soldagem de chapas relativamente finas (até 3 mm), uma vez que neste caso nem sempre se necessita de metal de adição e se espera uma baixa taxa de deformação térmica.

A técnica “keyhole” já tem sido utilizada em maior escala em aplicações industriais, principalmente em chapas mais espessas de materiais mais nobres (aços inoxidáveis, ligas de alumínio e titânio, por exemplo). Talvez por isso, tem sido alvo do maior número de estudos relacionados. Como os estudos têm se concentrado na modalidade “keyhole”, existe um grande vazio de informações para a soldagem de chapas finas, área que pode ser coberta pelas técnicas “melt-in” e “microplasma”, principalmente para materiais considerados não tão nobres, como é o caso dos aços estruturais ao carbono.

É justamente no desafio de preencher parte deste vazio que se enquadra o objetivo deste trabalho. A meta é propor e avaliar um novo procedimento de soldagem para o processo Plasma “melt-in”, o que inclui uma mistura gasosa (binária ou ternária) dedicada, que possibilite aumentar significantemente a velocidade de operação de uniões de chapas finas de aço de baixo carbono, apresentando ao mercado uma opção de soldagem de alta taxa de produção sem a necessidade do uso de material de adição (solda autógena), o que pode representar um avanço significativo na utilização do potencial oferecido pelo processo de soldagem a plasma. Para chegar a este novo procedimento de soldagem, procurou-se avaliar o efeito dos diversos parâmetros de soldagem no desempenho do processo, visando adquirir o seu “know-how”, e verificar a possibilidade de melhorar o desempenho pelo uso de consumíveis dedicados.

# Capítulo II

## Revisão Bibliográfica

O grande diferencial da soldagem a plasma em relação aos outros processos de soldagem a arco está no efeito de constrição do arco, como ilustra a Figura 2.1. Os principais efeitos que surgem com esta constrição são a formação de um perfil de arco colunar e esbelto e o aumento da velocidade do jato de plasma. Este perfil de arco permite maior concentração do calor e melhor aproveitamento da temperatura (maior temperatura alcançada na superfície da chapa), que, aliados à grande velocidade do jato de plasma (maior energia cinética), intensifica a penetração ou possibilita que maiores velocidades de soldagem sejam utilizadas. Além disso, a soldagem a plasma é menos propensa a variações da concentração de calor com alterações na distância tocha-peça.

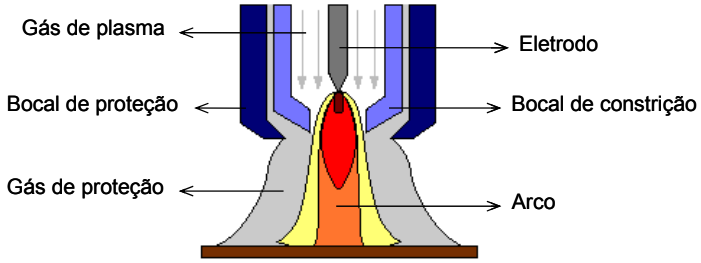



Figura 2.1: Representação esquemática do processo de soldagem Plasma

Dentre os modos de operação da soldagem a plasma, encontra-se a técnica “melt-in”. Também conhecida por soldagem a plasma convencional ou por fusão, esta técnica utiliza correntes de soldagem na faixa de 15 a 200 A (TWI, 2004). Nessa faixa de corrente, o processo a plasma se comporta de maneira similar ao processo TIG, o que torna esses processos concorrentes. A principal diferença é que no processo a plasma o arco é constrito. Isso proporciona maior rigidez de arco (DULL, 2001) e maior densidade de energia que o processo TIG (PINFOLD; JUBB, 1973a), levando a um maior poder de penetração. Além disso, por ficar confinado dentro da tocha, na soldagem a plasma o eletrodo é menos propenso a contaminações (TWI, 2004), o que aumenta consideravelmente seu tempo de vida, reduzindo o número de paradas para afiação (AIR LIQUIDE, 2002).

De acordo com Richardson (1991), na técnica “melt-in” a vazão do gás de plasma é relativamente baixa e a força exercida sobre a poça de fusão não tende a ser muito diferente da força provocada por um arco aberto. Entretanto, segundo a AWS (1991), em geral cordões

de solda mais estreitos e de maior penetração podem ser produzidos, comparado ao que seria obtido em condições similares utilizando o processo TIG. Além disso, por proporcionar maior concentração de calor e, por isso, possibilitar velocidades de soldagem mais elevadas, a soldagem a plasma “melt-in” pode reduzir as distorções em até 50% comparado ao processo TIG. Ainda da mesma fonte (AWS, 1991), uma vez que as características de direcionalidade do arco e de resistência a perturbações externas, inerentes ao processo a plasma, são mantidas, é possível controlar de maneira mais consistente a qualidade da solda.

Apesar das vantagens, a falta de informações consolidadas sobre o ajuste dos parâmetros de soldagem e a complexidade inerente ao processo explicam o motivo pelo qual a técnica “melt-in” ainda não é largamente empregada na indústria em geral.

## 2.1 Aplicabilidade

Uma das grandes vantagens do processo Plasma, principalmente em se tratando de logística, é a possibilidade de eliminação do uso de arame (metal de adição), o que elimina mais um item com relação às operações de compra, transporte e estoque de material. Essa vantagem, aliada a outras características positivas do processo de soldagem a plasma, tem transformado o processo a plasma “melt-in” (convencional) em um concorrente direto de outros processos convencionais, como o TIG e mesmo o MIG/MAG em diversas aplicações. Devido às propriedades fundamentais da soldagem a plasma, Messager & Cuny (1982) afirmam que é possível obter resultados mais confiáveis na soldagem de aços inoxidáveis utilizando este processo do que aqueles obtidos utilizando os processos clássicos. Segundo estes autores, os recentes desenvolvimentos gerais da soldagem a plasma fazem com que essa confiabilidade de resultados seja estendida ao campo da soldagem de aços ao carbono.

Como exemplo de aplicação do processo a plasma pela técnica “melt in”, Messager & Cuny (1982) citam a soldagem da parte superior de amortecedores destinados à indústria automobilística. Outros exemplos de aplicação seriam a fabricação de radiadores, soldagem de pontos críticos em motores de automóveis, soldagem de componentes elétricos como chapas para transformadores e alternadores (AIR LIQUIDE, 2002). Segundo a AGA (19??), é possível utilizar o processo a plasma em aplicações para a união de aço ao carbono nas posições plana, horizontal e vertical, possibilidades estas também citadas por Messager & Cuny (1982). Acredita-se, porém, que o campo de aplicações desta técnica se estenda à soldagem de compressores e demais componentes para linha branca, além de eixos e componentes estruturais para veículos automotores, o que incluiria a confecção dos chamados “tailored blanks”. O termo “tailored blanks” refere-se a painéis conformados a partir de várias chapas de

aço soldadas como uma “colcha de retalhos”. A Figura 2.2 ilustra de forma esquemática esta técnica de fabricação.

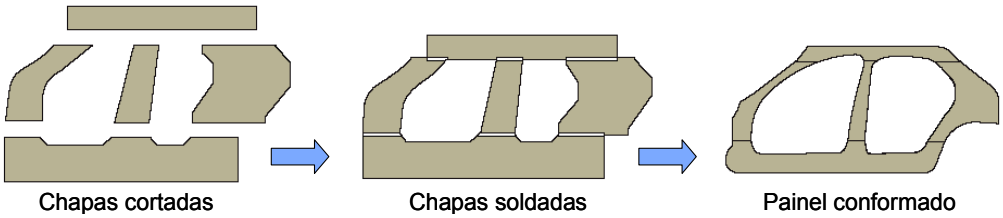



Figura 2.2: Aplicação de “Tailored Blank” em painel lateral de veículo automotor - cada uma das partes pode ter espessura e propriedades mecânicas diferentes (adaptado de Miyazaki et al., 2003)

## 2.2 Tipos de junta

Segundo Harris (19??), o tipo mais comum de junta utilizado no processo plasma, em todos os modos de operação, é a junta de topo. No caso particular do modo de operação “melt in”, é comum também o uso de juntas em aresta ou sobrepostas. A Figura 2.3 ilustra os três tipos de juntas típicas utilizadas para a soldagem a plasma pela técnica “melt-in”.

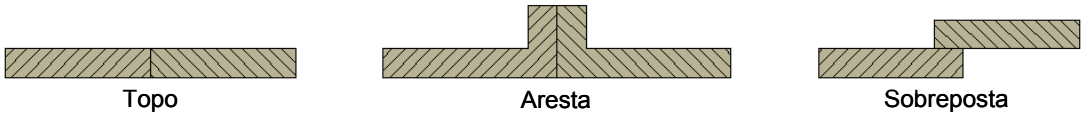



Figura 2.3: Juntas típicas para soldagem Plasma pela técnica “melt-in”

Ainda segundo Harris, de maneira geral, no processo de soldagem a plasma o posicionamento e fixação das juntas é mais crítico que no processo TIG, devido à natureza mais concentrada do arco plasma em relação ao arco TIG.

## 2.3 Gases

Dentre os consumíveis utilizados na soldagem a plasma, os gases são de grande relevância para o desempenho do processo, mas, segundo Bennett (1990), representam apenas 2 a 3% do custo de fabricação em soldagem, demonstrando que o custo não deve ser o fator preponderante em se tratando da escolha destes consumíveis.

De acordo com Crichton (1975), a seleção dos gases (plasma e proteção) é feita em função do tipo de material a ser soldado e as propriedades que podem ter influência no desempenho da soldagem a plasma são a capacidade de transferência de calor a altas temperaturas e a reatividade desses gases. A Tabela 2.1 lista os principais gases utilizados nos processos de soldagem, dentre os quais os mais usados na soldagem a plasma de aço ao

carbono: Argônio, Hidrogênio e Hélio. Mesmo que raramente, é possível encontrar aplicações da soldagem a plasma em que são utilizados gases oxidantes (misturas de Argônio com $O_2$ e/ou $CO_2$ ou $CO_2$ puro), mas exclusivamente como gás de proteção.

Tabela 2.1: Principais gases utilizados em soldagem (adaptado de Geipl & Stenke, 1995)

| Gás | Densidade ($kg/m^3$) | Potencial de dissociação (eV) | Potencial de ionização (eV) | Reatividade |
|---|---|---|---|---|
| Argônio - Ar | 1,784 | - | 15,8 | Inerte |
| Hidrogênio - $H_2$ | 0,090 | 4,5 | 13,6 | Redutor |
| Hélio - He | 0,178 | - | 24,6 | Inerte |
| Nitrogênio - $N_2$ | 1,251 | 9,7 | 14,5 | Não reativo* |
| Oxigênio - $O_2$ | 1,429 | 5,1 | 13,6 | Oxidante |
| Dióxido de carbono - $CO_2$ | 1,977 | 4,3 | 14,4 | Oxidante |

** O comportamento do nitrogênio varia de acordo com o material de base*

### 2.3.1 Gás de plasma

Com relação à escolha do gás de plasma para a soldagem de aços ao carbono, segundo a AGA (19??), o comum é que o Argônio seja utilizado como gás de plasma, proteção e purga. A AWS (1991) cita que o Argônio é preferido como gás de plasma graças ao seu baixo potencial de ionização, que garante um arco-piloto confiável e uma abertura de arco mais segura.

Ainda de acordo com a AGA (19??), a mistura de Argônio com 5% de Hidrogênio é outra opção largamente utilizada na soldagem a plasma aplicada em aços ao carbono. A grande vantagem da utilização dessa mistura gasosa é a possibilidade de aumentar a velocidade de soldagem em torno de 30%. A AWS (1991) alega que adições de Hidrogênio ao Argônio produzem um arco mais quente e mais eficiente em se tratando de transferência de calor para a peça, justificando dessa forma as maiores velocidades de soldagem obtidas para uma determinada corrente. Ainda segundo a AGA (19??), a utilização deste gás nas funções de formador de plasma e de proteção fica vetada para aços de maior teor de carbono, devido ao risco de ocorrência de trincas induzidas pelo Hidrogênio.

Em seus estudos, Pinfold & Jubb (1974) relatam que a adição de Hidrogênio ao Argônio para aplicações na soldagem a plasma é limitada entre 1 e 15%, sendo que misturas com 5, 8 e 15% de Hidrogênio são típicas. As principais razões para a adição de Hidrogênio (especialmente no gás de proteção) são: a formação de uma atmosfera redutora, capaz de produzir uma solda de aspecto limpo e, o aumento do foco do arco, que aumenta a concentração do plasma. Pinfold & Jubb (1974) explicam, ainda, que devido ao alto potencial de ionização do Hidrogênio, a porção de plasma condutora de corrente é confinada dentro da camada externa de gás contendo Hidrogênio.

Já Liebisch (1978), explica que o Hidrogênio cria uma barreira similar à constrição mecânica do arco feita pelo bocal. Além disso, as moléculas de Hidrogênio, dissociadas no contato com o arco, armazenam energia e quando entram em contato com a superfície “fria” da peça se recombinam, liberando a energia de dissociação. O Hidrogênio não age somente como um gás focalizador do arco, mas participa consideravelmente na transferência de energia para a peça. Outro ponto positivo em relação ao uso de Hidrogênio na soldagem a plasma é que, de acordo Liebisch (1978), o Hidrogênio diminui a tensão superficial da poça de fusão e conseqüentemente melhora a molhabilidade e, de acordo com Craig (1988), também a fluidez. Além disso, o Hidrogênio se combina com o oxigênio do ar produzindo vapor, que é liberado na atmosfera, eliminado assim o risco de oxidação (CRAIG, 1988). Liebisch (1978) menciona, ainda, que para casos nos quais o uso Hidrogênio seja contra-indicado, o Hélio, apesar de difícil ionização, pode ser utilizado por provocar a focalização do plasma, efeito semelhante ao causado pelo Hidrogênio. Segundo Liebisch, somente em casos raros misturas de Argônio e Hélio são usadas como gás de plasma e não mais do que 10% de Hélio deve ser utilizado. Liebisch ressalta que testes utilizando misturas de Nitrogênio e Hidrogênio não mostraram qualquer valor prático significante.

### 2.3.2 Gás de proteção

Em se tratando da escolha do gás de proteção, Harris (19??) aponta o material de base como fator determinante. É sugerido que para aços ao carbono, seja utilizado Argônio ou misturas de Argônio com 2 a 5% de Hidrogênio. Para aços de baixa liga e inoxidáveis austeníticos, o comum é que seja usado Hélio ou misturas de Argônio com 2 a 5% de Hidrogênio. Segundo Harris, Hélio e misturas de Argônio e Hélio podem ser usados como gás de proteção por aumentarem a condutividade térmica do gás e, conseqüentemente, o efeito de aquecimento da poça de fusão. O uso de Hélio favorece a formação de poças de fusão mais largas em relação a utilização de Argônio. A adição de Hidrogênio ao Argônio na função de gás de proteção tende a promover poças de fusão um pouco mais estreitas graças à constrição do arco e produz cordões de solda com aspecto de limpeza por ser um gás redutor. Em seu estudo, Harris ressalta que apesar do Hélio e Hidrogênio serem adicionados ao Argônio na função de gás de proteção para oferecer maior calor imposto, o uso de tais gases em grande quantidade, como gás de plasma, pode levar a um sobre-aquecimento e potencial dano na tocha de soldagem.

Como é de conhecimento geral, a adição de Hidrogênio e Hélio ao Argônio, seja com a finalidade de compor o gás de plasma ou o gás de proteção, faz a tensão do arco aumentar.

Os exemplos mencionados demonstram que maiores tensões não necessariamente indicam cordões mais largos.

## 2.4 Efeito dos gases de soldagem sobre a geometria do cordão

De acordo com Lavigne et al. (1988), a escolha e a combinação dos gases afeta de maneira particular, não só a velocidade de soldagem passível de utilização, mas também os parâmetros de forma da solda - largura do cordão e a forma da zona fundida. Esse estudo mostra que a utilização de Argônio como gás de plasma e de proteção favorece a formação de cordões estreitos. Por outro lado, utilizando Argônio como gás de plasma e uma mistura de Argônio e Hidrogênio como proteção, ocorrem altas temperaturas na poça de fusão, resultando em alargamento do cordão e possibilitando aumento da velocidade de soldagem. A tensão de arco, neste caso, é maior que com Argônio puro.

Já utilizando uma mistura de Argônio e Hidrogênio, tanto como gás de plasma como de proteção, a tendência é que os efeitos do Hidrogênio descritos anteriormente sejam acentuados, já que é maior a presença deste gás no arco. Caso seja utilizada uma mistura de Argônio e Hidrogênio como gás de plasma, e simplesmente Argônio como gás de proteção, novamente, devido ao Hidrogênio presente no arco, altas temperaturas são alcançadas. Entretanto, o Argônio periférico tolera uma ionização extensiva, provocando a dilatação do arco, o que de certa forma limita a velocidade de soldagem.

No caso de Argônio como gás de plasma e Hélio como gás de proteção, o Argônio facilita a abertura de arco e o Hélio tem um efeito significante no formato da solda. Por causa de sua elevada condutividade térmica, a transferência de calor é aumentada, resultado em uma zona fundida excessivamente larga e profunda, o que pode levar a dificuldades operacionais. Vale ressaltar que a elevada condutividade térmica do Hélio pode possibilitar o uso de maiores velocidades de soldagem.

Além da influência dos gases, sabe-se que a geometria do cordão é também influenciada pelos parâmetros de soldagem como corrente e velocidade de soldagem, energia cinética do gás de plasma, distância tocha-peça, inclinação da tocha e por outros fatores, tais como as propriedades físico-químicas do metal de base e até mesmo pelo acabamento da chapa.

## 2.5 Seleção dos parâmetros de soldagem

O processo de soldagem a plasma pela técnica “melt in” é uma opção de fabricação que pode ter grande aceitação nas uniões de chapas com juntas de topo, em arestas ou

sobrepostas, com espessuras inferiores a 3 mm, e onde se requeira uma alta produtividade (soldagem automatizada).

Uma das razões pelas quais a aplicação da soldagem a plasma em aço ao carbono ainda não foi massificada é o desconhecimento de parâmetros de soldagem confiáveis (AGA, 19??). A seleção de parâmetros de soldagem para aplicação do processo a plasma pela técnica “melt in” é bastante complexa, pois envolve um grande número de variáveis. O comum é selecionar a corrente de soldagem em função da espessura de chapa a ser soldada e em seguida selecionar os demais parâmetros, tais como diâmetro e ângulo de afiação do eletrodo, tipo e vazão dos gases de plasma e proteção. A Tabela 2.2 sugere a seleção de alguns parâmetros em função da corrente de soldagem a ser utilizada.

Tabela 2.2: Seleção de parâmetros em função da corrente de soldagem (Harris, 19??)

| Corrente (A) | Ø Eletrodo (mm) | Afiação do eletrodo (º) | Gás de plasma (Ar) | | Gás de proteção (Ar ou Ar+$H_2$) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Ø Bocal (mm) | Vazão (l/min) | Ø Bocal (mm) | Vazão (l/min) |
| 50 | 4,8 | 30 | 1,17 | 0,71 | 17 | 4 - 12 |
| 100 | | | 1,57 | 0,94 | | |
| 160 | | | 2,36 | 1,42 | | |
| 200 | | | 3,20 | 1,65 | | |

Além da falta de conhecimento de parâmetros de soldagem seguros, de acordo com a AGA (19??), um outro fator que contribui para a desconfiança quanto à utilização do processo plasma na soldagem de aços ao carbono é a formação de porosidade. Segundo a AGA, a formação de porosidade na soldagem a plasma de aços ao carbono tem sido relacionada ao grau de desoxidação do aço (acalmado, semi-acalmado e efervescente), decorrente do processo siderúrgico. Entretanto, estudos realizados pela própria AGA (19??), indicam que a formação de porosidade independe do desoxidante (alumínio ou silício) utilizado na fabricação do aço e está relacionada à utilização de gases de proteção e de purga inadequados. Além da adequação dos gases, a AGA ressalta que é de suma importância remover óxidos e outros contaminantes da região imediatamente adjacente à junta antes de efetuar a soldagem de aço ao carbono pelo processo a plasma. É recomendado que esta remoção seja efetuada por meio de esmerilhamento ou jateamento.

Finalmente, uma característica que também dificulta a utilização do processo Plasma “melt-in” em aço ao carbono, principalmente quando se almeja altas velocidades de soldagem, é o aparecimento de irregularidades sobre o cordão, fenômeno normalmente denominado “dente de serra” ou “costa de dragão”. Este fenômeno será descrito posteriormente em outro item.

## 2.6 Efeito dos parâmetros de soldagem sobre a geometria do cordão

Em sua revisão sobre o processo de soldagem a plasma, Pinfold & Jubb (1973b) fazem algumas considerações sobre a influência dos parâmetros de soldagem na morfologia dos cordões obtidos com a técnica “keyhole”. Considerando que a principal característica do processo de soldagem a plasma, a constrição de arco (efeitos térmicos e mecânicos), é mantida seja qual for a técnica de soldagem empregada (microplasma, “melt-in” ou “keyhole”), é possível estender as considerações de Pinfold & Jubb também aos cordões obtidos com a técnica “melt-in”. Segundo estes autores, os principais parâmetros de controle da geometria de cordão são a corrente de soldagem, a velocidade de soldagem e a vazão do gás de plasma.

De acordo com Pinfold & Jubb (1973b), operar em um nível de corrente abaixo do nível considerado ótimo causa falta de penetração. Por outro lado, um aumento na corrente aumenta a penetração e aplaina o cordão, podendo inclusive causar sua depressão. Vale ressaltar que o nível de corrente também afeta a vida do bocal de constrição.

Em condições normais de soldagem, a coluna do arco é isolada da parede interna do bocal por uma camada de gás relativamente fria e que não conduz eletricidade (gás não ionizado), fornecendo um isolamento térmico e elétrico que protege a superfície interna do bocal de constrição. Pinfold & Jubb (1973b) afirmam que em níveis mais elevados de corrente, existe a possibilidade deste isolamento ser rompido e o arco passar a fluir primeiro para o bocal de constrição, aquecendo-o excessivamente, e só depois seguir para a peça de trabalho. Este fenômeno é conhecido como arco-duplo e além de poder ser provocado por excesso de corrente, pode ser causado por vazão insuficiente de gás de plasma ou por contato acidental do bocal de constrição com a peça de trabalho (AWS, 1991). O arco-duplo, ilustrado esquematicamente na Figura 2.4, pode desgastar rapidamente o bocal de constrição. Tal fato certamente prejudica a formação de cordões de qualidade, pois afeta a constrição do arco, justamente o diferencial da soldagem a plasma.

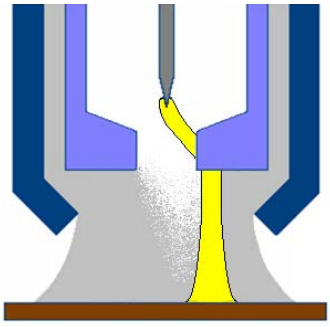


Figura 2.4: Formação de arco-duplo (baseado em Pinfold & Jubb, 1973b)

Outro parâmetro de controle da geometria do cordão é a velocidade de soldagem. Para Pinfold & Jubb (1973b), elevadas velocidades de soldagem para um determinado nível de corrente podem causar mordeduras e reduzir a penetração. Já a operação em baixas velocidades pode resultar em excesso de calor transferido para a peça e conseqüente formação de poças de fusão de grandes dimensões.

Em relação ao fluxo de gás de plasma, que é o principal parâmetro responsável pela energia cinética do arco, Pinfold & Jubb afirmam, na mesma publicação, que a redução no valor da vazão diminui o poder de penetração. De forma contrária, um aumento na vazão eleva o poder de penetração, fato confirmado por Bukarov et al. (1976), e tende a aplainar o cordão, existindo, porém, a possibilidade de ocorrer perturbação excessiva na poça de fusão, o que pode comprometer a qualidade dos cordões.

Apesar de serem considerados como parâmetros secundários, o diâmetro do bocal, o recuo do eletrodo e a distância tocha-peça podem, também, influenciar as características geométricas da solda. A Figura 2.5 mostra essas três variáveis do processo de soldagem a plasma.

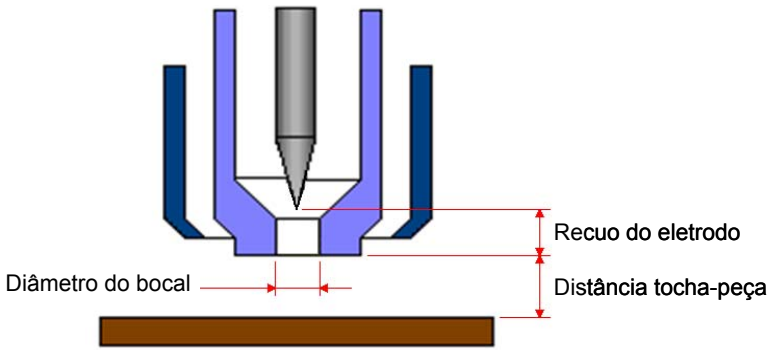



Figura 2.5: Diâmetro do bocal, recuo do eletrodo e distância tocha-peça

O bocal de constrição é responsável pelo efeito de constrição física do arco e o diâmetro de seu orifício pode afetar consideravelmente a soldagem. Segundo Pinfold & Jubb (1974), um aumento no diâmetro do orifício constritor diminui a densidade de corrente e reduz o poder de penetração da soldagem a plasma. Um efeito contrário também é verificado. Segundo Richardson (1991), definida uma condição de soldagem, a concentração de energia e a pressão do arco serão tanto maiores quanto menor for o diâmetro do orifício constritor, tendência confirmada por Bukarov et al. (1976) em se tratando do comportamento da pressão exercida pelo arco. Partindo desses princípios, o diâmetro do orifício constritor deveria ser o menor possível para aumentar ao extremo a concentração e a pressão do arco e assim, a capacidade de penetração, mas na prática isso não é possível devido ao maior risco de surgimento de arco-duplo e de perturbações excessivas na poça de fusão.

Os bocais mais utilizados são aqueles com um único orifício central, por onde passam o arco e todo o gás de plasma. Entretanto, podem ser utilizados bocais com orifícios auxiliares para a passagem de parte do fluxo de gás de plasma. De acordo com Lavigne et al. (1988), é possível reduzir a largura do cordão usando bocais com três orifícios arranjados transversalmente à direção de soldagem. Esses bocais possuem dois orifícios auxiliares posicionados ao lado do orifício constritor de tal maneira que os fluxos laterais de gás forçam a secção transversal do arco a assumir uma forma elíptica (alongada na direção de soldagem), produzindo um ligeiro pré-aquecimento. Segundo Pinfold & Jubb (1974), esse artifício de modelar o arco produz uma zona afetada pelo calor mais estreita e possibilita um aumento de 50 a 100% nas velocidades de soldagem em relação àquelas obtidas com bocais simples (único orifício). A Figura 2.6 ilustra um bocal de constrição com orifícios auxiliares e seu efeito no formato da secção transversal do arco.

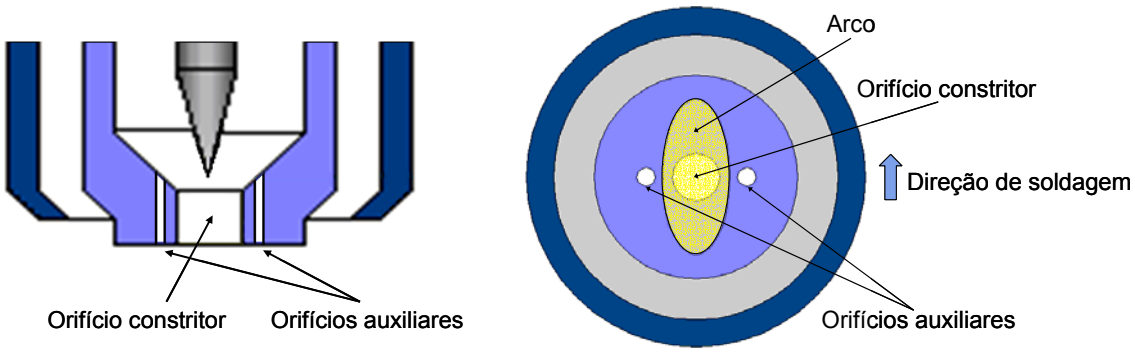



Figura 2.6: Bocal de constrição com orifícios auxiliares (baseado em Pinfold & Jubb, 1974)

Outro parâmetro que tem influência sobre a forma geométrica da solda é o recuo do eletrodo, que é definido pela distância entre a face externa do bocal de constrição e o eletrodo. O ajuste desta distância atua sobre o grau de constrição do arco, influenciando em sua rigidez e no poder de penetração da soldagem. Os valores máximo e mínimo para o recuo do eletrodo normalmente variam conforme a tocha de soldagem, sendo geralmente definidos pelo fabricante. Valores típicos ficam entre 0,8 e 2,4 mm (THERMAL DYNAMICS, 1994) e Lavigne et al. (1988) recomenda uma precisão de pelo menos 0,2 mm no ajuste deste parâmetro.

Em sua revisão sobre o assunto, Richetti (2003) menciona que o uso de maiores recuos favorece a formação de arcos mais colimados (maior concentração de energia) levando, segundo Richardson (1991), à formação de cordões de solda mais estreitos e de grande penetração. Já a utilização de menores recuos, conforme menciona Richetti em sua revisão, tende a diminuir o efeito de colimação, o que resulta em arcos mais difusos e com menor concentração de energia, levando à formação de cordões mais largos e de menor penetração.

Um parâmetro que exerce pouca influência sobre a forma do cordão é a distância tocha-peça. Segundo Richardson (1991), a natureza colunar e a força do arco constrito fazem da soldagem a plasma um processo pouco sensível a variações neste parâmetro, permitindo a utilização de arcos relativamente longos sem que haja redução significativa na concentração de energia. Entretanto, segundo Bukarov et al. (1976), um aumento neste parâmetro provoca a redução da pressão do arco, o que pode diminuir a penetração. Além disso, pode-se dizer ainda que, mantidos os demais parâmetros de soldagem, um aumento na distância tocha-peça significa um maior comprimento de arco, o que reduz a eficiência de transferência de calor, resultando em menor penetração. Segundo a AWS (1991), o valor máximo utilizado para a distância tocha-peça é de cerca de 6 mm, existindo, evidentemente, uma faixa de trabalho onde os resultados obtidos são os melhores. Apesar de variações na distância tocha-peça não produzirem, em geral, alterações perceptíveis na solda, deve-se evitar distâncias muito pequenas que permitam ao bocal facilmente tocar na poça de fusão devido ao risco de formação de arco-duplo.

Em relação ao posicionamento da tocha, em Welding Design & Fabrication (1992) existem recomendações para que as operações manuais de soldagem a plasma pela técnica “melt-in” sejam feitas com a tocha inclinada em um ângulo de 30º e apontando para a direção de soldagem (empurrando). Para operações mecanizadas a tocha também deve ser apontada para a direção de soldagem, só que inclinada em apenas 15º.

## 2.7 Instabilidades da poça de fusão

Em certas condições da soldagem a plasma, a formação do metal de solda (cordão) é bastante comprometida. Para Shneerson & Bykhovskii (1980), no caso de juntas em arestas, os principais defeitos observados são a formação de cordões com aspecto de serra (também conhecido como “costa de dragão”) e falta de fusão. A Figura 2.7 ilustra o aspecto característico do defeito em forma de serra (cordão ondulado) passível de ocorrer na soldagem a plasma de aço ao carbono.

Figura 2.7: Formato esquemático característico de cordões de solda com aspecto de serra (baseado em Shneerson & Bykhovskii, 1980)

Ainda segundo Shneerson & Bykhovskii (1980), existe uma correlação, apresentada na Figura 2.8, entre a corrente de soldagem máxima permissível, a espessura do metal de base e a velocidade de soldagem. A partir deste valor de corrente não é mais possível obter cordões

isentos de defeitos do tipo “dente de serra” (formação de ondulações). Em seus testes, Shneerson & Bykhovskii utilizaram corpos de prova de 500 x 30 mm com pequena dobra (aresta), confeccionados em aço de baixo carbono em uma faixa de 0,6 a 1,8 mm de espessura. A tocha de soldagem foi posicionada em ângulo reto em relação à peça, foi usado um bocal de plasma de 5 mm de diâmetro e uma distância tocha-peça de 3 mm. Foi utilizado Ar como gás de plasma, a 1,7 l/min de vazão, e $CO_2$ como gás de proteção, a uma vazão de 5 l/min. A velocidade de soldagem foi variada em uma faixa de 3,3 mm/s a 45 mm/s e as soldagens foram feitas em polaridade direta, ou seja, eletrodo negativo.

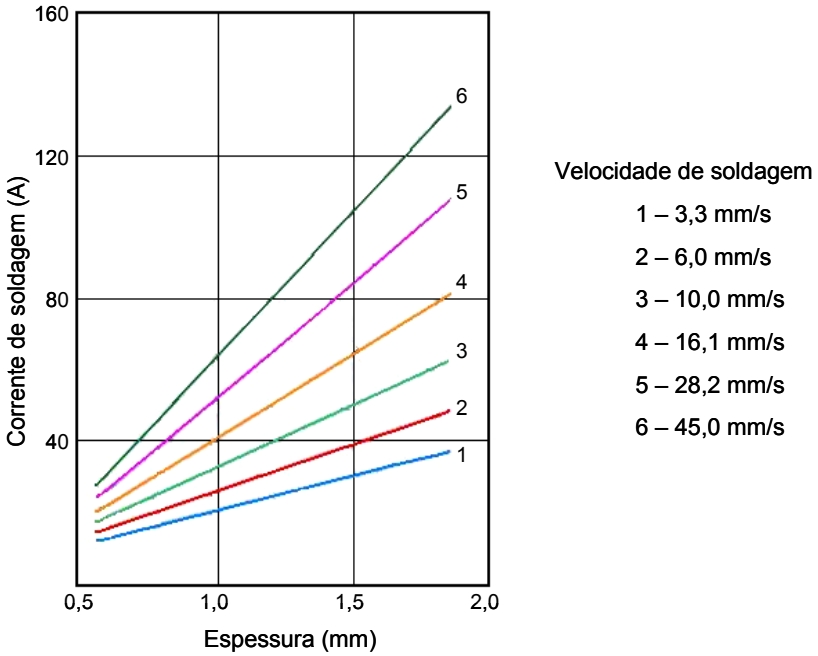



Figura 2.8: Corrente máxima em função da espessura do metal base e da velocidade de soldagem (adaptado de Shneerson & Bykhovskii, 1980)

De acordo com a Figura 2.8, fica claro que quanto maior a espessura do metal de base, mais elevado é o valor da corrente de soldagem que pode ser utilizado sem a inconveniência de defeitos. Além disso, é notório que quanto maior a velocidade de soldagem utilizada, maior a possibilidade de aumento de corrente para uma determinada variação na espessura do metal de base, sem que exista, entretanto, o risco de formação de defeitos tipo formato de serra.

Shneerson & Bykhovskii também verificaram que variações no diâmetro do bocal de plasma e na distância tocha-peça têm influência direta na corrente de soldagem máxima permissível. A Figura 2.9 mostra a variação da faixa de corrente na qual se pode operar, sem o risco de ocorrência de defeitos tipo formato de serra e sem falta de fusão, em função do diâmetro do bocal de plasma utilizado. Já a Figura 2.10 mostra a variação da corrente máxima permissível em função da distância tocha-peça ajustada.

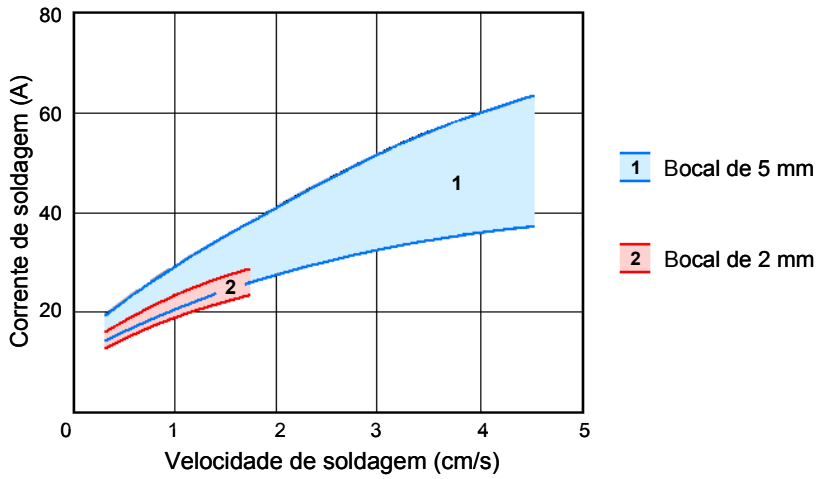



Figura 2.9: Faixa de corrente indicada em função da variação diâmetro do bocal de plasma (adaptado de Shneerson & Bykhovskii, 1980)

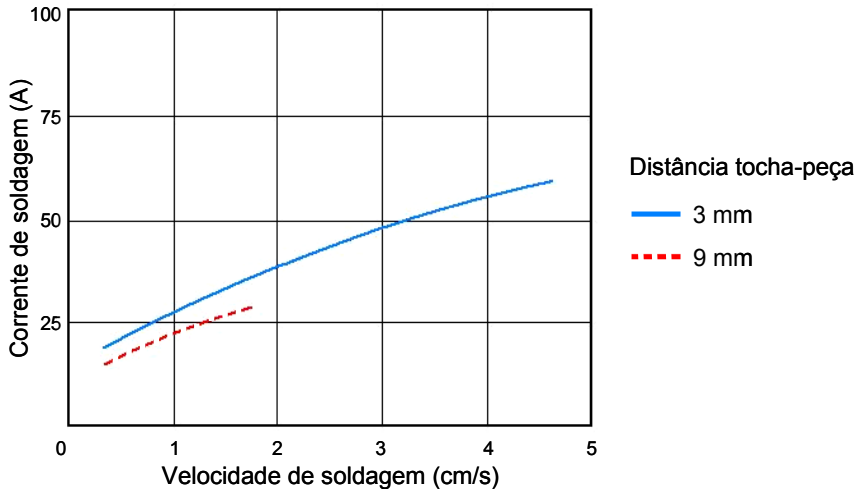



Figura 2.10: Corrente máxima permissível em função da variação na distância tocha-peça (adaptado de Shneerson & Bykhovskii, 1980)

Ainda segundo Shneerson & Bykhovskii, uma variação de 25º na posição da tocha de soldagem em relação à vertical (no sentido empurrando ou puxando), reduz significativamente a corrente de soldagem máxima que pode ser utilizada sem a formação de defeitos. A Tabela 2.3 mostra a tendência de queda nos valores de corrente máxima quando o posicionamento da tocha é feito fora da posição vertical.

Tabela 2.3: Efeito da inclinação da tocha sobre a corrente de soldagem máxima (adaptado de Shneerson & Bykhovskii, 1980)

| Velocidade de soldagem (cm/s) | Inclinação da tocha | | |
|---|---|---|---|
| | 90º | 65º | 115º |
| | Corrente de soldagem (A) | | |
| 0,33 | 19 | 16 | 14 |
| 0,60 | 25 | 22 | 15 |
| 1,00 | 30 | 26 | 20 |
| 1,61 | 38 | 32 | 24 |
| 2,82 | 50 | 46 | 32 |
| 4,50 | 62 | 57 | 45 |

*Obs: Metal de base: aço de baixo carbono de 1,0 mm de espessura. Os autores não deixam claro qual ângulo (65º ou 115º) se refere à direção empurrando e qual se refere à direção puxando.*

De acordo com Shneerson & Bykhovskii, o comportamento da corrente de soldagem máxima em função do diâmetro do bocal de plasma, ou da distância tocha-peça, ou ainda da inclinação da tocha de soldagem, pode ser explicado se o arco plasma for considerado não só como uma fonte de calor, mas também como um agente que exerce um efeito de força sobre a poça de fusão. Ou seja, o arco plasma não pode ser considerado exclusivamente como um agente térmico, devendo ser considerado, também, como um agente mecânico.

Shneerson & Bykhovskii afirmam que o aumento na pressão de arco com o aumento da constrição (diminuição do diâmetro do bocal de plasma) leva à formação de ondas na superfície do cordão e acaba estreitando a faixa de região na qual ocorre a formação de cordões normais, livres de defeitos. Um efeito idêntico é exercido pela variação do ângulo de inclinação da tocha de soldagem, fator que modifica a componente horizontal da força exercida pelo arco sobre a poça de fusão. Ainda considerando o arco como um agente mecânico, e de acordo com estes mesmos autores, um aumento na distância tocha-peça, apesar de diminuir a pressão na poça, reduz a estabilidade do arco, o que leva a perturbações adicionais na poção de fusão, facilitando formação das ondas na superfície do cordão em baixas correntes de soldagem.

Baseado no estudo de Shneerson & Bykhovskii, pode-se dizer que dois tipos de superfície podem se formar no cordão de solda ao se utilizar o processo plasma “melt-in”, normal e ondulada. A faixa de condições ótimas de soldagem para evitar a formação de superfícies onduladas e assim garantir a formação de cordões normais, para uma determinada faixa de espessura de metal de base, é determinada pela velocidade de soldagem, pelo grau de constrição do arco, pela distância tocha-peça e pela inclinação da tocha de soldagem.

O mesmo Shneerson (1986) cita outro defeito comum à soldagem plasma de aço de baixo carbono quando aplicada em chapas finas, que é justamente um campo de atuação da técnica “melt-in”. De acordo com Shneerson, neste tipo de aplicação pode ocorrer uma espécie de instabilidade, particularmente em juntas de topo, que pode até mesmo provocar a perfuração da junta. Shneerson relata que alguns estudos relacionados a este tema mostram que este defeito é causado principalmente pela forte pressão no centro do arco, que provoca um afinamento local e ruptura do metal líquido. Além da força provocada pela pressão do arco, Shneerson menciona que algumas experiências indicam que a velocidade e corrente de soldagem também são determinantes na ocorrência deste tipo de defeito. A Figura 2.11 ilustra o aspecto característico das perfurações passíveis de ocorrer na soldagem a plasma de aço ao carbono, se aplicada em chapas finas. Shneerson ressalta que é possível ocorrer a formação de ondulações simultaneamente à ocorrência de perfurações, algo semelhante ao defeito em forma de serra – estudado por Shneerson & Bykhovskii (1980) – que pode se apresentar na soldagem de juntas em aresta.

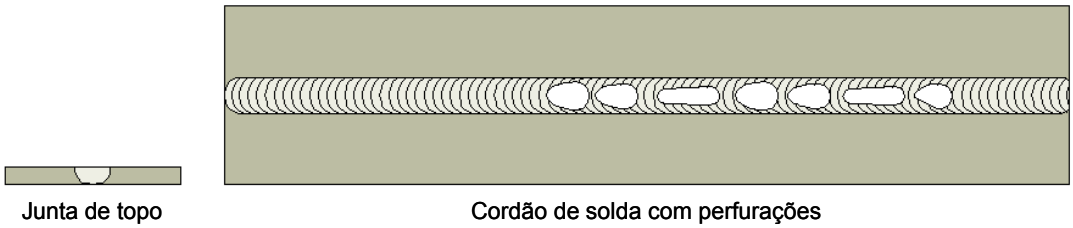



Figura 2.11: Formato característico das perfurações presentes nos cordões de solda (baseado em Shneerson, 1986)

Shneerson afirma que alguns estudos mencionam que outros fatores ponderam a favor da formação destas irregularidades (perfurações e ondulações). A negligência quanto à qualidade de montagem dos componentes a serem soldados – espaçamentos entre chapas, desalinhamento na altura de arestas, entre outros – é um exemplo típico.

## 2.8 Efeito dos parâmetros de soldagem nas propriedades mecânicas da junta

Segundo o TWI (2001), aços de baixo carbono possuem uma baixa capacidade de endurecimento, não tendo assim grande tendência de aumento de resistência. Usando boas práticas de soldagem (restrição moderada, remoção do excesso de óleos, etc) eles podem ser facilmente unidos pelos processos convencionais de soldagem a arco, dentre eles a soldagem a plasma, sem grande risco de ruptura. Ainda de acordo com o TWI, as propriedades mecânicas da união resultante da soldagem, tais como dureza, resistência mecânica, resistência à fadiga ou ainda ductibilidade e conformabilidade, determinam a adequação da

solda em uma configuração particular de junta para uma dada aplicação. Entretanto, para chapas finas dá-se maior ênfase à resistência mecânica, ductilidade e conformabilidade.

O principal fator responsável por possíveis modificações nas referendadas propriedades mecânicas da junta é a energia imposta de soldagem. Este parâmetro reúne a influência da corrente, tensão, velocidade de soldagem e do próprio processo (rendimento térmico). Para soldagem a arco elétrico, que é o caso da soldagem a plasma, a energia imposta de soldagem ($E_{imp}$) ou aporte térmico é definida como:

$$E_{imp} = \eta \cdot \frac{I.U}{v} \qquad (2.1),$$

onde:

η é o rendimento térmico do processo;
I é a corrente de soldagem em Ampéres (A);
U é tensão de arco em Volts (V); e
v é a velocidade soldagem em mm/s.

De acordo com Zeemann (2003), a energia imposta de soldagem, juntamente com as características geométricas da junta e nível de pré-aquecimento, determina os ciclos térmicos impostos sobre o material, definindo as transformações microestruturais e, conseqüentemente, as propriedades e características mecânicas resultantes. Segundo Zeemann, é importante não confundir energia de soldagem com densidade de fonte. A soldagem a plasma, objeto de estudo neste presente trabalho, por exemplo, é de alta densidade e em geral de baixa energia imposta de soldagem, pois, para o mesmo comprimento linear, é capaz de adicionar menor quantidade de calor para fundir o material se comparado a outros processos de soldagem a arco elétrico, como o TIG por exemplo.

As alterações microestruturais, no caso dos aços ao carbono, são definidas pelo teor de carbono e pela velocidade de resfriamento. Como a quantidade de energia de soldagem adicionada à junta pelo processo de soldagem a plasma em geral não é elevada e se a aplicação for em aços de baixo teor de carbono, não existirá grande tendência em ocorrer modificações significantes nas propriedades e características mecânicas da junta em relação ao metal de base. Ou seja, a junta soldada tende a permanecer com boa ductibilidade e conformabilidade (características dos aços de baixo teor de carbono), ainda que a resistência mecânica melhore em relação ao material de base.

# Capítulo III

## Montagem Experimental, Calibrações e Ensaios Preliminares

### 3.1. Objetivo

O objetivo desta fase do trabalho foi determinar uma condição padrão para soldagem a plasma de aço comum ao carbono, numa junta conforme Figura 3.1, visando a otimização e determinação da faixa de tolerância de ajuste dos parâmetros.

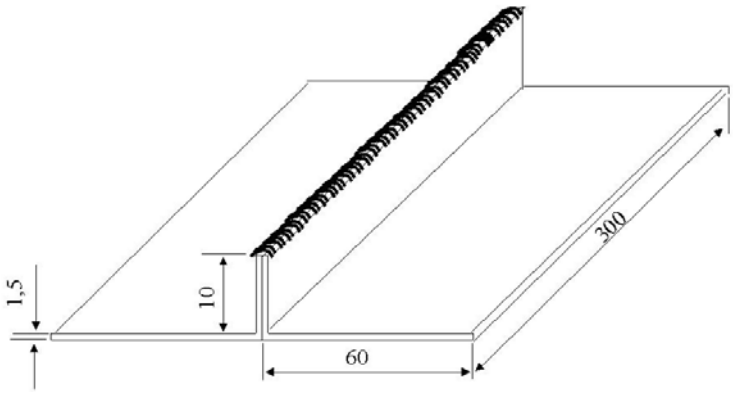



Figura 3.1: Tipo de junta (aresta) e dimensões (mm) do corpo de prova

### 3.2 Metodologia utilizada

Antes de dar início à soldagem dos corpos de prova e avaliar os resultados, procedeu-se à montagem de uma bancada para soldagem automatizada dos corpos de prova, que permitisse precisão de movimento e liberdade para posicionamento variado da tocha de soldagem. Em seguida, foi feita a calibração da mesa de coordenadas e dos medidores de vazão de gás.

#### 3.2.1 Montagem da bancada

A Figura 3.2 mostra a bancada experimental básica utilizada para o desenvolvimento deste trabalho. Esta bancada foi composta dos seguintes itens:

- Uma fonte de soldagem eletrônica Inversal/300 da IMC (este equipamento permite ajustar o valor da corrente de soldagem com resolução de 1 A, assim como ajustar uma rampa de subida para a corrente na abertura do arco);

- Um módulo plasma para a referida fonte, da IMC;
- Um medidor/controlador de vazão do gás de plasma (CONTROL GÁS-PLASMA 1, construído no Laprosolda/UFU);
- Uma tocha de soldagem PWM-300, da THERMAL DYNAMICS CORPORATION;
- Um medidor de vazão do gás de proteção MGV-2, da IMC;
- Uma mesa de coordenadas X-Y controlada por computador, desenvolvida no Laprosolda/UFU (esta mesa permite, através de um programa computacional, controlar o movimento da tocha de soldagem em duas direções ortogonais (X,Y) a uma dada velocidade de soldagem desejada, permitindo ainda impor uma rampa de subida da velocidade de soldagem e o estabelecimento de um retardo para o início do movimento da tocha em relação à abertura do arco).

Figura 3.2: Bancada experimental

### 3.2.2 Calibração da Mesa de Coordenadas

Conforme a Figura 3.3, a velocidade no eixo X foi calibrada com auxílio de uma escala e de um cronômetro. Foram empregadas 11 velocidades distintas para percorrer trajetórias de 400 mm. Após a realização das medições obteve-se a seguinte equação de calibração:

$$y = 0{,}8287x + 90{,}396 \qquad (3.1),$$

onde: y = Velocidade real (mm/min) e

x = Velocidade digitada no computador (mm/min)

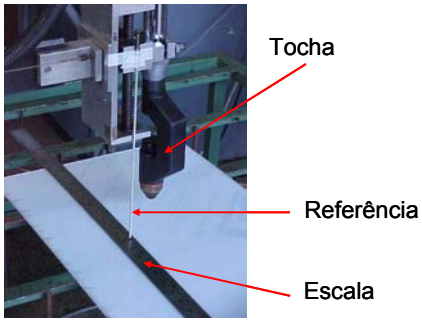



Figura 3.3: Arranjo experimental para calibração da velocidade do eixo X da mesa

### 3.2.3 Calibração do medidor de vazão para o gás de proteção

O medidor de vazão de gás de proteção (mostrado na Figura 3.2) é do tipo turbina, com indicador digital. O mesmo foi colocado entre o cilindro de gás e a fonte de soldagem, como mostra a Figura 3.4. Como já é de conhecimento, a leitura de um medidor como este é função das perdas de carga (tubulações, válvulas e tochas, à vazante) e do tipo de gás.

A calibração do medidor de vazão para gás de proteção foi feita com auxílio de um bolhímetro (mostrado na Figura 3.4), com a tomada de vazão posicionada na saída da tocha (bocal). Em função da necessidade de preservar o interesse do patrocinador deste projeto de desenvolver consumíveis dedicados, neste trabalho as misturas a base de Argônio não serão explicitadas, apenas referenciadas por códigos alfanuméricos em função do aditivo utilizado. A codificação utilizada será melhor discutida no capítulo VIII.

Voltando à calibração, usou-se como gás de proteção a mistura a base de Argônio denominada A50 comercial, na faixa de 6 a 12 l/min. A equação de calibração resultante vale exclusivamente para as condições com as quais foi feita a calibração, que são as mesmas que serão utilizadas nos testes. Apesar de que em alguns testes serão utilizados gases diferentes da mistura A50 comercial, admitir-se-á a mesma calibração de vazão já que se espera pouca influência do tipo de gás utilizado. A equação abaixo mostra a grande diferença existente entre os valores lidos no medidor de vazão e os reais, causados principalmente pelas perdas de carga na tocha.

$$y = 2{,}3931x - 4{,}8713 \qquad (3.2),$$

onde: y = Vazão real (l/min) e

x = Vazão lida no medidor (l/min)

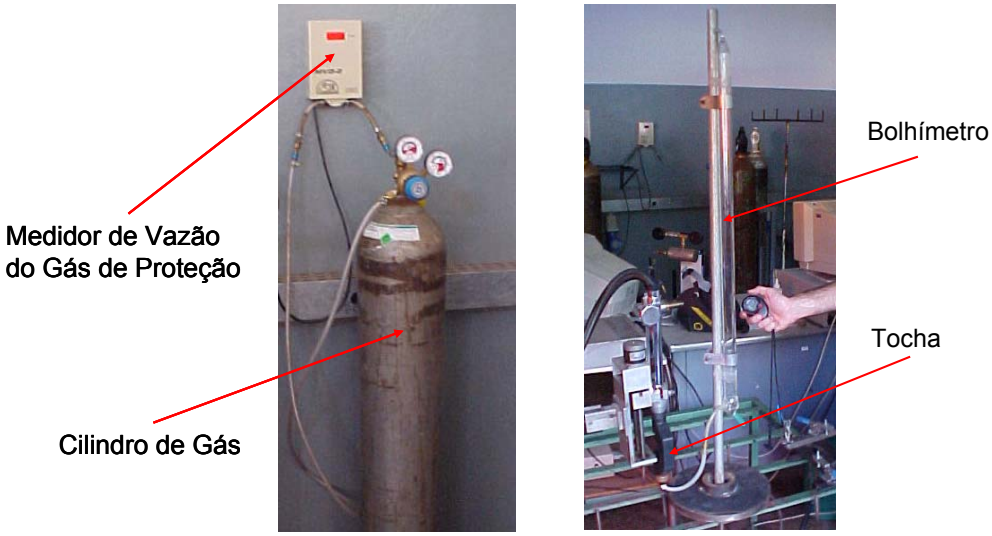



Figura 3.4: Detalhe do medidor de vazão do gás de proteção instalado na linha de gás e do aparelho de calibração de vazão

### 3.2.4 Calibração do medidor/controlador de vazão para o gás de plasma

De forma similar ao gás de proteção, mas usando-se um bolhímetro para menores vazões, o medidor/controlador de gás de plasma foi também calibrado (tanto o bolhímetro usado quanto o medidor/controlador de gás são mostrados na Figura 3.5).

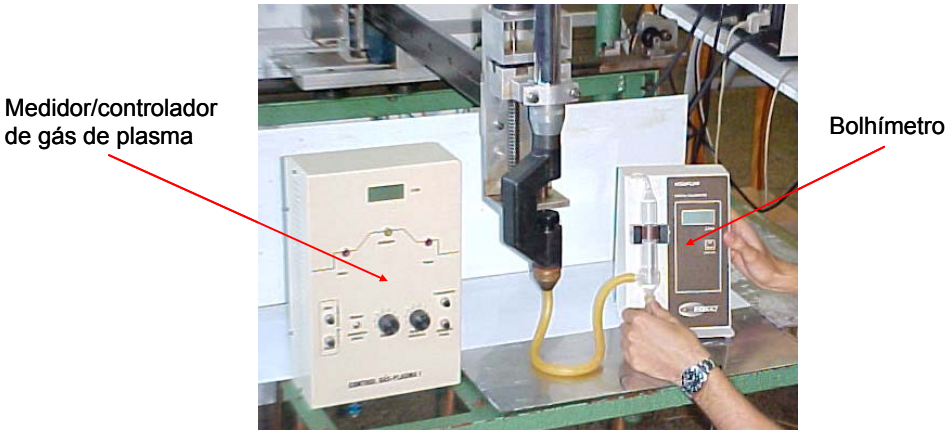



Figura 3.5: Arranjo experimental para calibração do medidor/controlador de gás de plasma

Este medidor/controlador foi colocado entre o cilindro do gás e o módulo plasma e sua leitura é também função das perdas de carga (tubulações, válvulas e tocha, à vazante) e do tipo de gás. Usou-se Argônio como gás para calibração, numa faixa de 1,0 a 2,0 l/min. A equação de calibração resultante vale exclusivamente para as condições com as quais foi feita a calibração, que são as mesmas dos testes (exceto o gás). A equação abaixo mostra que a diferença existente entre os valores lidos no medidor/controlador de vazão e os reais é bem

menor do que no caso anterior (medidor de vazão para gás de proteção), já que este medidor/controlador foi feito com calibração para tocha de plasma, ou seja, dedicado a este processo, enquanto o medidor de gás de proteção foi feito com calibração para uma tocha MIG/MAG.

$$y = 1{,}321x - 0{,}3 \qquad (3.3),$$

onde: y = Vazão real (l/min) e
x = Vazão lida no medidor (l/min)

### 3.3 Soldagem dos corpos de prova e avaliação dos resultados

Para garantir que a junta dos corpos de prova não se abrisse durante a soldagem, as chapas foram unidas por pontos de solda por resistência (Figura 3.6) e, posteriormente, rigidamente fixadas em um suporte (Figura 3.7).

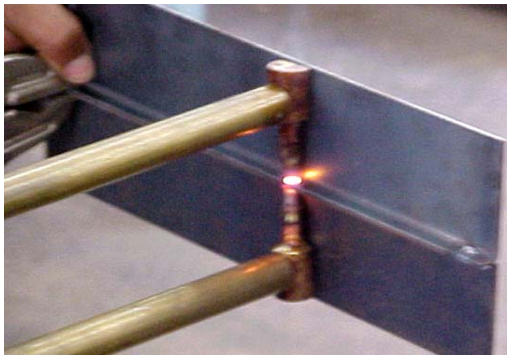


Figura 3.6: Soldagem por resistência do corpo de prova

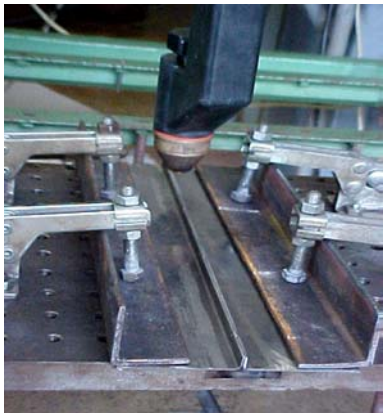


Figura 3.7: Suporte de fixação do corpo de prova

### 3.3.1 Determinação de uma faixa de velocidade de soldagem

Procurou-se reduzir progressivamente a velocidade de soldagem na mesa de coordenadas, a partir de 1400 mm/min, para se determinar a faixa de velocidade que apresentasse cordões aceitáveis (aspecto visual, baseado na regularidade e integridade do cordão), mantendo-se constante:

- Diâmetro (5 mm) e material do eletrodo (AWS EW-Th2);
- Afastamento do eletrodo (mínimo = 0,8mm);
- Gás de plasma (Ar a 0,6 l/min);
- Gás de proteção (mistura A50 comercial a 12 l/min);
- Altura da tocha (3 mm);
- Ângulo de ataque (90$^o$).

A Tabela 3.1 apresenta as condições dos testes, enquanto a Figura 3.8 mostra a aparência de um trecho de cordão considerado aceitável (conforme) e trechos sem conformidade (não conformes), tanto por apresentarem irregularidadedo cordão (dente de serra), como por apresentarem falta de fusão, ambos defeitos mencionados por Shneerson & Bykhovskii (1980).

Tabela 3.1: Condições de soldagem para os ensaios iniciais (Série 1-1)

| Teste | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|
| 1-1-1 | 1400 | 280 | 90% (irregularidadeno final) |
| 1-1-2 | 1300 | 280 | 70% (irregularidades no início e no final) |
| 1-1-3 | 1200 | 280 | 65% (irregularidades distribuídas) |

*Constantes: Corrente de soldagem: 135 A; Retardo da mesa: 0,5 s; Sem rampa de velocidade de soldagem.*

Trecho de cordão conforme

Trecho não conforme (costas de dragão)

Trecho não conforme (falta de fusão)

Figura 3.8: Aparência de trechos de cordões

De acordo com os testes realizados, verificou-se que, para a corrente de 135 A e demais condições fixas de soldagem, a maior aceitabilidade do cordão de solda ocorreu para a velocidade de 1400 mm/min.

### 3.3.2 Planejamento experimental para estudo dos efeitos dos parâmetros

Através de um planejamento experimental $L_{18}$, apresentado na Tabela 3.2 (18 experimentos), foi proposto estudar o efeito das seguintes variáveis e respectivos níveis:

- Distância tocha-peça (DTP) = 2 e 5 mm;
- Corrente média de soldagem (Im) = 80, 120 e 160 A;
- Vazão do gás de plasma (VAZGASPLA) = 0,6, 1,2 e 1,8 l/min;
- Ângulo de ataque (ANGATAQ) = 70º, 90º, 110º;
- Diâmetro do bocal (DIAMBOC) = 2,4, 2,8 e 3,2 mm;
- Afastamento do eletrodo (AFASELE) = mínimo, mínimo e máximo;
- Vazão do gás de proteção (VAZGASPRO) = 8, 12 e 16 l/min.

Tabela 3.2: Planejamento experimental para estudo dos efeitos dos parâmetros de soldagem

| Teste | DTP | Im | VAZGASPLA | ANGATAQ | DIAMBOC | AFASELE | VAZGASPRO |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2-1-1 | 2 | 80 | 0,6 | 70 | 2,4 | Mín | 8 |
| 2-1-2 | 2 | 80 | 1,2 | 90 | 2,8 | Máx | 12 |
| 2-1-3 | 2 | 80 | 1,8 | 110 | 3,2 | Mín | 16 |
| 2-1-4 | 2 | 120 | 0,6 | 70 | 2,8 | Máx | 16 |
| 2-1-5 | 2 | 120 | 1,2 | 90 | 3,2 | Mín | 8 |
| 2-1-6 | 2 | 120 | 1,8 | 110 | 2,4 | Mín | 12 |
| 2-1-7 | 2 | 160 | 0,6 | 90 | 2,4 | Mín | 12 |
| 2-1-8 | 2 | 160 | 1,2 | 110 | 2,8 | Mín | 16 |
| 2-1-9 | 2 | 160 | 1,8 | 70 | 3,2 | Máx | 8 |
| 2-1-10 | 5 | 80 | 0,6 | 110 | 3,2 | Máx | 12 |
| 2-1-11 | 5 | 80 | 1,2 | 70 | 2,4 | Mín | 16 |
| 2-1-12 | 5 | 80 | 1,8 | 90 | 2,8 | Mín | 8 |
| 2-1-13 | 5 | 120 | 0,6 | 90 | 3,2 | Mín | 16 |
| 2-1-14 | 5 | 120 | 1,2 | 110 | 2,4 | Máx | 8 |
| 2-1-15 | 5 | 120 | 1,8 | 70 | 2,8 | Mín | 12 |
| 2-1-16 | 5 | 160 | 0,6 | 110 | 2,8 | Mín | 8 |
| 2-1-17 | 5 | 160 | 1,2 | 70 | 3,2 | Mín | 12 |
| 2-1-18 | 5 | 160 | 1,8 | 90 | 2,4 | Máx | 16 |

*Constantes: Velocidade de soldagem: 1400 mm/min; Retardo da mesa: 0,5 s; Sem rampa de velocidade de soldagem.*

Por este planejamento experimental esperava-se ser possível verificar a significância de cada parâmetro sobre a qualidade da solda. Manter-se-iam fixos os seguintes parâmetros:

- Velocidade de soldagem (1400 mm/min);
- Diâmetro (5 mm) e material do eletrodo (AWS EW-Th2);
- Gás de plasma (Ar);
- Gás de proteção (mistura A50 comercial);

Deu-se início às soldagens escolhendo aleatoriamente alguns experimentos, como mostra a Tabela 3.3. Entretanto, como após 4 experimentos não ocorreram cordões com um mínimo de aceitabilidade, decidiu-se verificar a causa desta desconformidade antes de concluir a soldagem de todos os experimentos planejados.

Tabela 3.3: Resultados de alguns testes baseados no planejamento experimental (série 2-1)

| Teste | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|
| 2-1-3 | 300 | 0% (falta de fusão) |
| 2-1-5 | 300 | 5% (irregularidades e falta de fusão distribuídas) |
| 2-1-13 | 300 | 10%(irregularidades e falta de fusão distribuídas) |
| 2-1-17 | 300 | 5% (irregularidades distribuídas) |

### 3.3.3 Verificação da influência da velocidade e da corrente de soldagem

Iniciou-se esta fase verificando a influência da corrente, mantendo-se constante a velocidade de soldagem. Como nos ensaios realizados anteriormente houve grande incidência de falta de fusão, optou-se por usar uma velocidade de soldagem menor do que a encontrada como ideal nos testes da Tabela 3.1. A Tabela 3.4 mostra as condições de soldagem e os resultados encontrados para a esta série de testes (série 3-1).

Tabela 3.4: Condições de soldagem e resultados para os ensaios da série 3-1

| Teste | Corrente (A) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|
| 3-1-1 | 135 | 300 | 80% (algumas irregularidades distribuídas) |
| 3-1-2 | 140 | 300 | 100% |
| 3-1-3 | 145 | 290 | 95% |
| 3-1-4 | 135 | 270 | 65% (irregularidade no início) |
| 3-1-5 | 140 | 270 | 50% (irregularidades no início e no final) |
| 3-1-6 | 140 | 300 | 60% (irregularidade no início) |
| 3-1-7 | 140 | 300 | 95% (irregularidade em um dos pontos) |
| 3-1-8 | 140 | 300 | 0% (irregularidade total) |

| Teste | Corrente (A) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|
| 3-1-9 | 140 | 300 | 85% (irregularidades nos pontos) |
| 3-1-10 | 140 | 300 | 50% (irregularidade no início) |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: Ar a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm ; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Ângulo da tocha: 90°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Velocidade de soldagem: 1000 mm/min; Retardo: 4 s.*

Inicialmente, foram conduzidos os experimentos 3-1-1, 3-1-2 e 3-1-3. Notou-se uma tendência de melhores cordões para uma corrente de 140 A. Considerando este resultado, foram realizados mais seis testes nas condições de soldagem do experimento 3-1-2 e um teste nas condições do experimento 3-1-1, para verificar a repetibilidade da aceitabilidade do cordão de solda. Após uma análise dos corpos de prova, notou-se uma não repetibilidade nos resultados dos testes, ou seja, ocorreram cordões não conformes e conformes. Mesmo assim, partiu-se desta corrente (140 A) para verificar a influência da velocidade de soldagem (série 3-2), já que em testes preliminares a velocidade de 1400 mm/min havia mostrado proporcionar aceitabilidade. A Tabela 3.5 mostra as condições de soldagem e os resultados encontrados para a esta série de testes.

Tabela 3.5: Experimentos realizados para a série 3-2

| Teste | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|
| 3-2-1 | 900 | 90 | 75% (alta taxa de fusão) |
| 3-2-2 | 1000 | 95 | 95% (irregularidade no ponto de solda) |
| 3-2-3 | 1100 | 80 | 100% |
| 3-2-4 | 1200 | 90 | 90% (falta de fusão no início) |
| 3-2-5 | 1300 | 80 | 70% (falta de fusão no início) |
| 3-2-6 | 1400 | 300 | 20% (falta de fusão e irregularidades distribuídas) |
| 3-2-7 | 1500 | 95 | 0% (falta de fusão e irregularidades por todo cordão) |
| 3-2-8 | 1000 | 270 | 85% (falta de fusão no início e irregularidade nos pontos) |
| 3-2-9 | 1200 | 300 | 85% (falta de fusão no início e irregularidade nos pontos) |
| 3-2-10 | 1400 | 300 | 65% (falta de fusão e irregularidade nos pontos) |
| 3-2-11 | 1400 | 280 | 0% (falta de fusão e irregularidades por todo cordão) |
| 3-2-12 | 1400 | 130 | 70% (falta de fusão e irregularidades no início e no final) |
| 3-2-13 | 1500 | 135 | 5% (falta de fusão e irregularidades por todo cordão) |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: Ar a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Ângulo da tocha: 90°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Corrente de soldagem: 140 A.*

Iniciou-se com variação progressiva da velocidade de soldagem, como mostram os experimentos 3-2-1, 3-2-2, 3-2-3, 3-2-4, 3-2-5, 3-2-6 e 3-2-7. Notou-se uma maior aceitabilidade do cordão de solda na faixa de velocidade entre 1000 a 1300 mm/min. Levando-

se em conta estes resultados, foi realizado mais um teste nas condições de soldagem do experimento 3-2-2, um teste nas condições do experimento 3-2-4, três nas condições do experimento 3-2-6 e um teste nas condições do experimento 3-2-7, para verificar a repetibilidade da aceitabilidade do cordão de solda. Após uma análise dos corpos de prova, notou-se novamente uma não repetibilidade nos resultados dos testes, ou seja, ocorreram cordões não conformes e conformes.

Um fato notado foi que a maioria das descontinuidades iniciava-se sobre os pontos de solda por resistência (Figura 3.9). Chegava-se, inclusive, a perceber falhas no arco sempre que se passava sobre estes pontos. Como hipótese, acredita-se que tais pontos de solda podem ocasionar no corpo de prova oxidações localizadas, inclusive na forma de carepas e resíduos de cobre provenientes dos eletrodos utilizados na soldagem a ponto. A presença de óxido tem sido mencionada na literatura como causadora de irregularidades de cordão pelo efeito “humping” (Scotti, 1991) (que leva a aparência de costas de dragão / dente de serra). Existe, ainda, a possibilidade destes pontos estarem agindo como barreira para o jato do plasma, provocando seu retrocesso e, conseqüentemente, a instabilidade da poça.

Figura 3.9: Descontinuidades sobre pontos de solda por resistência

### 3.3.4 Avaliação de outros parâmetros sobre a não repetibilidade dos resultados

Considerando-se que a oxidação das chapas poderia ser um dos pontos chaves para provocar irregularidade dos cordões, todas as soldagens deste ponto em diante passaram por uma limpeza mais cuidadosa da junta. Depois de ponteadas por solda por resistência, as juntas foram escovadas utilizando-se escova mecânica.

Como primeira tentativa de encontrar uma forma de evitar a não repetibilidade nos experimentos, uma nova série de testes (série 4-1) foi realizada com a junta pré-aquecida. Para tal, a junta recebeu um passe de pré-aquecimento com uma corrente de 80 A (com velocidade de soldagem insuficiente para fusão), sem retardo e sem rampa de velocidade, seguido pelo passe de soldagem nas condições apresentadas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Testes realizados referentes à Série 4-1

| Teste | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|
| 4-1-1 | 1000 | 300 | 100% |
| 4-1-2 | 1000 | 300 | 100% |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: Ar a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm ; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Ângulo da tocha: 90°; Distância da tocha à peça: 3,5mm; Corrente de soldagem: 140 A; Retardo: 4,25.*

Pelos resultados notou-se que, utilizando pré-aquecimento, foi possível obter maior aceitabilidade do cordão de solda (é importante mencionar que não foram feitos outros testes para verificar a repetibilidade, mas os dois casos caracterizam uma evidência de tal). Acredita-se que a boa aceitabilidade deveu-se à melhora das condições de molhabilidade da poça de fusão, uma conseqüência direta do pré-aquecimento. Porém, por considerar que este pré-aquecimento é um problema do ponto de vista operacional, tentou-se encontrar outras formas de aumentar a repetibilidade.

Decidiu-se, então, ao invés de assegurar a posição da junta por pontos de solda, mantê-la unida rigidamente apenas utilizando o suporte de fixação. Para tal, foi desenvolvido um novo suporte (Figura 3.10), com maior rigidez.

Figura 3.10: Novo suporte de fixação

Porém, havia também a percepção de que um início mal feito da solda estivesse conduzindo a cordões instáveis. Por isto, procurou-se antes verificar a influência do retardo e da rampa de velocidade no processo de soldagem (série 4-2). A Tabela 3.7 mostra as condições de soldagem e os resultados encontrados para esta série de testes, enquanto a Figura 3.11 mostra exemplos de início de cordão considerados como ruins (por excesso ou por falta de fusão), regulares ou aceitáveis. Para aproveitar os experimentos, além de analisar os efeitos do retardo e da rampa de velocidade sobre o início do cordão, procurou-se analisar, também, o restante do cordão. Esta análise foi feita principalmente para aqueles casos em que ocorreu uma boa aceitabilidade do início do cordão de solda.

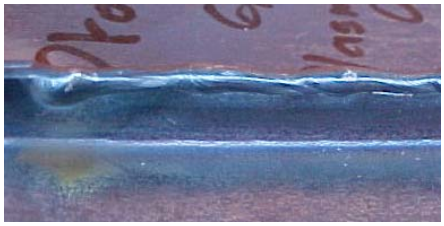
Tabela 3.7: Experimentos realizados na Série 4-2

| Teste | Vel. (mm/min) | Retardo (s) | Rampa de vel. (s) | Comprimento do cordão (mm) | Início do cordão | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 4-2-1 | 1000 | 2 | 2 | 260 | Regular | 70% (irregularidade no início) |
| 4-2-2 | 1000 | 2,5 | 2 | 300 | Ruim (excesso de fusão) | 90% (irregularidade no início) |
| 4-2-3 | 1000 | 4 | 2 | 300 | Ruim (excesso de fusão) | 55% (irregularidade distribuída) |
| 4-2-4 | 1000 | 2,5 | 3 | 140 | Regular (irregularidade) | 90% (irregularidade no início) |
| 4-2-5 | 1000 | 2 | 2 | 260 | Regular | 70% (irregularidade no início) |
| 4-2-6 | 1000 | 2,5 | 2 | 300 | Ruim (excesso de fusão) | 90% (irregularidade no início) |
| 4-2-7 | 1000 | 4 | 2 | 300 | Ruim (excesso de fusão) | 55% (irregularidade distribuída) |
| 4-2-8 | 1000 | 2,5 | 3 | 140 | Regular (irregularidade) | 90% (irregularidade no início) |
| 4-2-9 | 1000 | 2,5 | 4 | 140 | Ruim (excesso de fusão) | 0% (irregularidade por todo cordão) |
| 4-2-10 | 1000 | 1 | 1 | 140 | Ruim (falta de fusão) | 0% (irregularidade por todo cordão) |
| 4-2-11 | 1000 | 1 | 2 | 140 | Aceitável | 80% (falta de fusão e irregularidades distribuídas) |
| 4-2-12 | 1000 | 1 | 3 | 150 | Aceitável | 40% (irregularidades distribuídas) |
| 4-2-13 | 1000 | 2,5 | 2,5 | 300 | Ruim (excesso de fusão) | 65% (irregularidade no início) |
| 4-2-14 | 1000 | 4 | 0 | 80 | Regular (irregularidade) | 0% (falta de fusão e irregularidades distribuídas) |
| 4-2-15 | 1000 | 4,5 | 0 | 60 | Regular (irregularidade) | 85%(irregularidade no início) |
| 4-2-16 | 1200 | 4 | 0 | 300 | Regular (irregularidade) | 40%(falta de fusão e irregularidades distribuídas) |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: Ar a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Ângulo da tocha: 90°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Corrente de soldagem: 140 A.*

Início ruim (excesso de fusão)

Início ruim (falta de fusão)



Início regular

Início aceitável

Figura 3.11: Exemplos de início de cordão (início da solda da esquerda para a direita)

Pelos resultados, notou-se que utilizando um retardo entre 1 e 2 s e uma rampa de velocidade entre 2 e 3 s obteve-se melhor aceitabilidade no início do cordão de solda. Quanto ao restante do cordão, após análise dos corpos de prova, notou-se novamente a não repetibilidade nos resultados dos testes, ou seja, ocorreram cordões não conformes e conformes. Com relação a esses testes, notou-se ainda que algumas juntas se abriam durante o processo de soldagem (Figura 3.12). Essa abertura da junta poderia justificar a falta de repetibilidade nos testes.

Figura 3.12: Exemplo de junta que se abriu durante o processo de soldagem

Suspeitando-se de que o nível da corrente de soldagem (140 A) pudesse estar elevado (maior deformação), e assim prejudicando a aceitabilidade do cordão de solda, decidiu-se realizar uma nova série de testes (série 4-3), variando-se a corrente de soldagem e considerando os resultados da série de testes 4-2, que indicaram um retardo de 1,5 s e uma rampa de velocidade de 2,5 s como prováveis condicionadores de uma boa aceitabilidade do início do cordão de solda. Nesta nova série de testes (Tabela 3.8), procurou-se ainda verificar a influência da presença de óxidos na junta a ser soldada, sem a presença de folga. Por isto, foram utilizadas chapas de aço ao carbono de espessura próxima à da junta em aresta (duas chapas) e de composição química similar, ao invés da junta da Figura 3.1. A idéia foi simular a soldagem de junta em aresta utilizando apenas uma chapa de maior espessura.

Tabela 3.8: Experimentos realizados na série 4-3

| Teste | Corrente ( A ) | Estado da chapa | Comprimento do cordão (mm) | Início do cordão | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|---|---|
| 4-3-1 | 130 | Oxidada | 280 | Aceitável | 45% (irregularidades distribuídas) |
| 4-3-2 | 140 | Oxidada | 280 | Aceitável | 0% (irregularidades em todo cordão) |
| 4-3-3 | 130 | Limpa | 280 | Aceitável | 100% |
| 4-3-4 | 140 | Limpa | 250 | Aceitável | 85% (irregularidades distribuídas) |
| 4-3-5 | 150 | Limpa | 280 | Aceitável | 80% (irregularidades distribuídas) |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: Ar a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: $\approx 33°$; Ângulo da tocha: 90°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Velocidade de soldagem: 1000 mm/min; Retardo: 1,5 s; Rampa de velocidade: 2,5 s.*

A partir dos resultados, notou-se que a presença de óxidos é extremamente prejudicial para a aceitabilidade do cordão de solda, o que reforçou a importância da limpeza eficiente da juntas antes de se executar a soldagem. Já com relação às chapas limpas, obteve-se maior aceitabilidade do cordão de solda com a corrente de soldagem em 130 A. Além disso, verificou-se novamente a influência positiva do ajuste correto do retardo e da rampa de velocidade utilizados.

Foram realizados ainda dois testes: um com uma distância tocha-peça maior e outro com a vazão de gás de proteção maior. Ambos os testes foram feitos com a presença de óxidos na chapa (suja), não ocorrendo resultados satisfatórios quanto à melhoria da aceitabilidade do cordão de solda. Como forma de tentar melhorar a repetibilidade da aceitabilidade do cordão em relação à abertura da junta durante a soldagem, as bordas da chapa receberam uma pré-deformação (Figura 3.13). Esperava-se que as tensões causadas pela pré-deformação se opusessem à tendência que a junta tinha de se abrir, efeito causado pelas tensões térmicas resultantes do processo de soldagem. Foi realizada uma nova série de testes (série 4-4, Tabela 3.9) utilizando as juntas pré-deformadas, considerando os resultados da série de testes 4-3 e, novamente, os resultados da série 4-2 (quanto ao retardo e a rampa de velocidade). Nesta nova série de testes, variou-se a corrente de soldagem como forma de tentar comprovar o efeito que esta causava na aceitabilidade do cordão de solda, agora em condições em que outros fatores influentes pudessem estar eliminados.

Figura 3.13: Detalhe da junta pré-deformada

Tabela 3.9: Testes realizados na série 4-4

| Teste | Corrente ( A ) | Comprimento do cordão (mm) | Início do cordão | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|---|
| 4-4-1 | 120 | 300 | Aceitável | 50% (irregularidades em quase todo cordão) |
| 4-4-2 | 130 | 300 | Aceitável | 80% (irregularidades distribuídas) |
| 4-4-3 | 140 | 300 | Aceitável | 60% (irregularidades distribuídas) |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão 10,6 l/min; Gás de Plasma: Ar a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Ângulo da tocha: 90°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Velocidade de soldagem: 1000 mm/min; Retardo: 1,5 s; Rampa de velocidade: 2,5 s.*

A partir dos resultados apresentados na Tabela 3.9, confirmou-se que para uma corrente de soldagem de 130 A obteve-se maior aceitabilidade do cordão de solda. Confirmou-se, ainda, a influência positiva do ajuste correto do retardo e da rampa de velocidade.

Como a literatura sugere que a presença de óxidos e o uso de gás de proteção com maior teor de oxigênio aumentam a irregularidade do cordão, uma outra verificação exploratória foi feita em relação ao gás de proteção. Foram feitos testes utilizando Argônio puro como gás de proteção ao invés da mistura A50 comercial, também com as juntas pré-deformadas. Os resultados desta série de testes (série 4-5) são mostrados na Tabela 3.10.

Tabela 3.10: Testes realizados na série 4-5

| Teste | Corrente ( A ) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|
| 4-5-1 | 130 | 300 | 0% (irregularidades e falta de fusão em todo cordão) |
| 4-5-2 | 140 | 300 | 0% (irregularidades e falta de fusão em todo cordão) |

*Constantes: Gás de Proteção: Ar a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: Ar a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Ângulo da tocha: 90°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Velocidade de soldagem: 1000 mm/min; Retardo: 1,5 s; Rampa de velocidade: 2,5 s.*

Os resultados mostraram uma redução acentuada da qualidade do cordão com a utilização do Argônio puro como gás de proteção (não houve um mínimo de aceitabilidade). Esse fato, entretanto, pode não se dever ao menor caráter redutor do Argônio puro em relação à mistura A50 comercial, e sim ao fato do Argônio produzir um arco mais frio e menos concentrado em relação ao arco produzido com o uso da mistura A50 comercial, qualidades estas mencionadas por Harris (19??).

### 3.4 Discussão e conclusões preliminares

A partir dos resultados discutidos até aqui, dois fenômenos foram identificados. O primeiro trata-se de uma instabilidade da poça fundida, que faz com que não se forme um cordão contínuo, e sim saliências na forma de acúmulos intermitentes de material, no formato de “costa de dragão” (Figura 3.8), ou como denominado por Shneerson & Bykhovskii (1980) defeitos tipo formato de serra. Esta instabilidade tem sido referenciada por Scotti (1991) em sua revisão como sendo causada quando a velocidade de soldagem supera uma velocidade crítica. De acordo com o mencionado por Scotti, esta velocidade crítica cresce para correntes mais baixas, para comprimentos de arcos menores e para ângulos de trabalho da tocha na condição empurrando. Além disso, de acordo com os testes aqui realizados, a presença de oxigênio proveniente, tanto do gás de proteção, como de carepas e/ou óxidos na superfície da chapa, parece favorecer este fenômeno. Considera-se como solução o uso de arames

(eletrodos) com alto teor de desoxidantes (não possível no presente caso por se estar buscando uma opção de soldagem autógena).

Especificamente quanto a este estudo, trabalhar com velocidades abaixo da velocidade crítica não é tão óbvio, pois velocidades baixas, devido ao formato da junta, provocam excesso de fusão. Além disso, uma característica observada neste estudo é que a irregularidade dos cordões ocorre em trechos e de forma aleatória, e não em todo o cordão. Outra dificuldade está relacionada à falta de repetibilidade, ou seja, as mesmas condições de soldagem que levam à cordões conformes, também produzem cordões irregulares. Isto pode ser devido, tanto ao fato de existir algum parâmetro não identificado que interfere aleatoriamente no processo (parâmetro excluso), mas também por se tratar de um processo caótico (muda o comportamento sem razões aparentes).

De qualquer forma, parece existir uma relação estreita entre corrente e velocidade de soldagem que deve ser obedecida para se conseguir cordões em conformidade. Entretanto, para determinar com precisão esta relação, deve-se identificar e eliminar (controlar) os efeitos de parâmetros que tendem a desestabilizar a poça fundida. Até agora, pode-se dizer que a oxidação da junta é um fator causador de instabilidade. Por um motivo ainda não totalmente esclarecido, parece não ser indicado fazer a fixação das juntas utilizando-se soldagem a ponto por resistência. Por outro lado, o uso de parâmetros adequados no início de cordão parece ser uma prática que reduz as irregularidades ao longo do mesmo.

Dois comportamentos interessantes foram observados. O primeiro foi a melhoria da qualidade do cordão ao se pré-aquecer a junta com o próprio arco. O segundo foi a intensificação das irregularidades quando o gás de proteção foi trocado de A50 comercial por Argônio puro.

Conclui-se, portanto, que a viabilização da soldagem a plasma de aço comum ao carbono, com este tipo de junta, carece, ou da identificação dos parâmetros exclusos, ou da identificação de condições de soldagem conservadoras que evitem o estado caótico propício à irregularidade do cordão. Deve-se então, avaliar melhor os efeitos dos diversos parâmetros de soldagem, alguns ainda não explorados.

# Capítulo IV

## Estudo da Irregularidade dos Cordões

### 4.1 Objetivo

Continuar a verificação das causas para a irregularidade de cordões durante a soldagem a plasma de aço ao carbono, com o objetivo final de determinar uma condição padrão para soldagem da junta mostrada na Figura 3.1 do capítulo anterior.

### 4.2 Procedimento Experimental

A partir dos resultados apresentados no capítulo anterior, dois fenômenos foram identificados. O primeiro trata de uma instabilidade da poça fundida, que faz com que não se forme um cordão contínuo, e sim saliências na forma de acúmulos intermitentes de material, no formato de “costa de dragão”. O segundo fenômeno identificado retrata uma falta de repetibilidade, ou seja, as mesmas condições de soldagem que levam a cordões conformes também produzem cordões irregulares. Desta forma, neste capítulo se descreve os procedimentos para procurar identificar os parâmetros exclusos ou identificar condições de soldagem conservadoras que evitem os estado caótico propício à irregularidade do cordão.

#### 4.2.1 Influência do uso da mistura A50 comercial como gás de plasma

Nos testes realizados até o momento foi utilizada a mistura A50 comercial como gás de proteção enquanto para gás de plasma foi usado Argônio puro. Uma tentativa de se usar Argônio puro como gás de plasma e como gás de proteção mostrou uma redução acentuada da qualidade do cordão (não houve um mínimo de aceitabilidade). Como dito no capítulo anterior, esse fato poderia se dever tanto ao caráter menos redutor (mais oxidante) do Argônio puro em relação à mistura A50 comercial (apesar do Argônio ser inerte, durante a existência do arco pode haver absorção de Oxigênio, o que aconteceria em menor escala com a mistura A50 comercial), como ao fato do Argônio produzir um arco mais frio em relação ao arco produzido com o uso da mistura A50 comercial. Desta forma, nesta fase procurar-se-á verificar o comportamento da soldagem usando-se a mistura A50 comercial, tanto como gás de plasma como gás de proteção.

Iniciou-se esta fase (Série 5-1) verificando a influência da corrente de soldagem, mantendo-se uma velocidade de soldagem de 930 mm/min (Tabela 4.1). Um bom resultado foi alcançado com uma corrente de 110 A (teste 5-1-5). No entanto, após outros testes realizados não ocorreu uma repetibilidade nos resultados, ou seja, ocorreram cordões conformes e não conformes.

Tabela 4.1: Condições de soldagem e resultados para os ensaios da Série 5-1

| Teste | Corrente (A) | Retardo (s) | Rampa de velocidade (s) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão de solda |
|---|---|---|---|---|---|
| 5-1-1 | 140 | 1,5 | 2,5 | 275 | 0% (irregularidades por todo o cordão) |
| 5-1-2 | 130 | 1,5 | 2,5 | 128 | 0% (irregularidades por todo o cordão) |
| 5-1-3 | 125 | 1,5 | 2,5 | 145 | 70% (irregularidades distribuídas) |
| 5-1-4 | 115 | 1,5 | 2,5 | 128 | 30% (irregularidades por todo o cordão) |
| 5-1-5 | 110 | 2,5 | 2,5 | 144 | 95% (irregularidade concentrada) |
| 5-1-6 | 110 | 2,5 | 2,5 | 286 | 0% (irregularidades distribuídas) |
| 5-1-7 | 110 | 2 | 2,5 | 134 | 0% (irregularidades por todo o cordão) |
| 5-1-8 | 105 | 2 | 2,5 | 134 | 70% (falta de fusão distribuída) |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura A50 comercial a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Ângulo de ataque (da tocha): 90°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Velocidade de soldagem: 930 mm/min.*

A próxima série de testes (Série 5-2), resultados mostrados na Tabela 4.2, teve como objetivo confirmar o efeito de se usar Argônio puro como gás de plasma.

Tabela 4.2: Condições de soldagem e resultados para os ensaios da Série 5-2

| Teste | Corrente (A) | Retardo (s) | Rampa de velocidade (s) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|---|---|
| 5-2-1 | 110 | 1,5 | 2,5 | 124 | 10% (irregularidades distribuídas) |
| 5-2-2 | 125 | 1,5 | 2,5 | 124 | 15% (irregularidades distribuídas) |
| 5-2-3 | 140 | 1,5 | 2,5 | 140 | 40% (irregularidades distribuídas) |
| 5-2-4 | 160 | 1,5 | 2,5 | 147 | 50% (excesso de fusão) |
| 5-2-5 | 105 | 2,5 | 2,5 | 135 | 15% (irregularidade e falta de fusão) |
| 5-2-5 | 110 | 2,5 | 2,5 | 138 | 40% (irregularidades distribuídas) |
| 5-2-6 | 110 | 2 | 2,5 | 138 | 10% (irregularidades distribuídas) |
| 5-2-7 | 180 | 2 | 2,5 | 136 | 0% (irregularidades distribuídas) |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: Ar puro a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Ângulo de ataque (da tocha): 90°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Velocidade de soldagem: 930 mm/min.*

Comparando os resultados da série de testes 5-2 com os obtidos na série 5-1, notou-se que foram alcançados melhores resultados utilizando a mistura A50 comercial como gás de plasma.

Com o intuito de se confirmar o melhor desempenho da mistura A50 comercial como gás de plasma em relação ao Argônio puro, duas novas séries de testes, série 5-3 (Tabela 4.3), utilizando Argônio puro, e série 5-4 (Tabela 4.4), utilizando a mistura A50 comercial como gás de plasma, foram produzidas, nas quais a velocidade de soldagem foi alterada visando encontrar uma faixa de velocidade correlacionada com a aceitabilidade dos cordões de solda. Em ambas as séries foi utilizada uma corrente de soldagem de 180 A.

Tabela 4.3: Condições de soldagem e resultados para os ensaios da Série 5-3

| Teste | Corrente (A) | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão de solda |
|---|---|---|---|---|
| 5-3-1 | 180 | 720 | 135 | 0% (excesso de fusão e irregularidades distribuídas) |
| 5-3-2 | 180 | 760 | 136 | 10% (excesso de fusão e irregularidades distribuídas) |
| 5-3-3 | 180 | 800 | 288 | 70% (excesso de fusão e irregularidades distribuídas) |
| 5-3-4 | 180 | 850 | 134 | 50% (irregularidades distribuídas) |
| 5-3-5 | 180 | 930 | 145 | 15% (irregularidades distribuídas) |
| 5-3-6 | 180 | 1050 | 145 | 15% (irregularidades distribuídas) |
| 5-3-7 | 180 | 1100 | 133 | 10% (irregularidades distribuídas) |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: Ar puro a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Ângulo de ataque (da tocha): 90°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm ; Retardo: 1,5 s; Rampa de velocidade: 2,5 s.*

Tabela 4.4: Condições de soldagem e resultados para os ensaios da Série 5-4

| Teste | Corrente (A) | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|---|
| 5-4-1 | 180 | 750 | 140 | 80% (excesso de fusão) |
| 5-4-2 | 180 | 800 | 150 | 85% (excesso de fusão) |
| 5-4-3 | 180 | 800 | 288 | 85% (excesso de fusão) |
| 5-4-4 | 180 | 890 | 140 | 70% (excesso de fusão e irregularidades) |
| 5-4-5 | 180 | 1000 | 120 | 0% (irregularidade) |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura A50 comercial a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Ângulo de ataque (da tocha): 90°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1,5 s; Rampa de velocidade: 2,5 s.*

A partir das séries de testes 5-3 e 5-4, confirmou-se um melhor desempenho da soldagem com o uso da mistura A50 comercial como gás de plasma. Entretanto, não foi possível encontrar a faixa de velocidade conforme planejado. No caso, verificou-se apenas que, ao se utilizar a mistura A50 comercial como gás de plasma, ocorreram cordões de melhor aceitabilidade para uma faixa de velocidade entre 750 e 890 mm/min (quando se utilizou Argônio puro como gás de plasma, não ocorreram cordões conformes em nenhuma faixa de velocidade).

Considerando estes resultados, decidiu-se adotar a mistura A50 comercial como gás de plasma para as próximas séries de testes, por entender que houve uma melhora do comportamento do processo de soldagem.

### 4.2.2 Influência do uso de gás de purga

Na próxima série de testes (Série 6-1), tentou-se melhorar a aceitabilidade dos cordões utilizando um gás de purga (Argônio puro a uma vazão de 6 l/min). Com tal procedimento, tentou-se promover uma maior proteção na raiz da solda contra possíveis oxidações. Os resultados desta nova série de testes são apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Condições de soldagem e resultados da Série 6-1 (Ar como gás de purga)

| Teste | Corrente (A) | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|---|
| 6-1-1 | 180 | 890 | 140 | 0% (excesso de fusão e irregularidades) |
| 6-1-2 | 115 | 890 | 135 | 90% (irregularidades) |
| 6-1-3 | 115 | 890 | 275 | 0% (irregularidades distribuídas) |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura A50 comercial a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Ângulo de ataque (da tocha): 90°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1,5 s; Rampa de velocidade: 2,5 s.*

A princípio iniciou-se esta série com uma corrente de 180 A (teste 6-1-1), o que não condicionou um cordão conforme. Partiu-se, então, para uma corrente menor, com a qual alcançou-se uma boa aceitabilidade. No entanto, novamente não ocorreu uma repetibilidade nos testes, ou seja, ocorreram cordões conformes e não conformes.

No momento não se tirou nenhuma conclusão sobre o efeito do gás de purga, deixando este assunto para ser tratado em outra etapa.

### 4.2.3 Influência do ângulo de inclinação da tocha de soldagem

Como tentativa de se alcançar melhores resultados, variou-se o ângulo de ataque da tocha de soldagem conforme esquema apresentado na Figura 4.1 e ilustração mostrada na Figura 4.2. Sabendo-se que o arco exerce uma certa pressão sobre a poça de fusão, tentou-se verificar a influência desta inclinação na forma pela qual a pressão do arco atua na poça (Série 7-1). A Tabela 4.6 mostra os resultados obtidos.

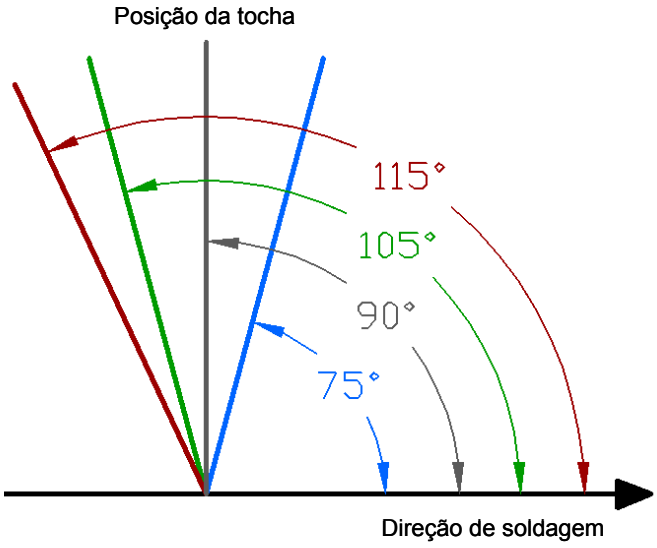
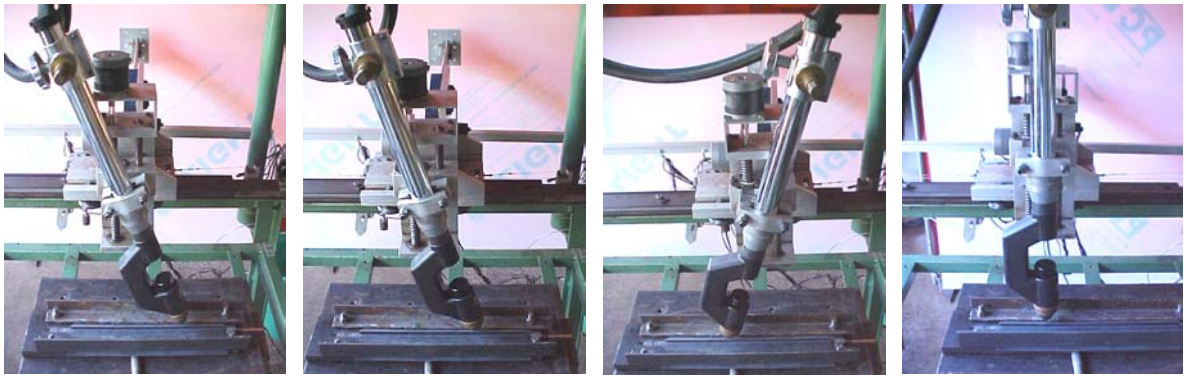



Figura 4.1: Esquema dos ângulos de ataque da tocha



115º 105º 75º 90º

Figura 4.2: Tocha de soldagem nos diferentes ângulos de ataque (direção de soldagem: )

Teoricamente, com a tocha posicionada no sentido de puxar a poça de fusão (ângulo de ataque menor do que 90º), a pressão exercida pelo arco sobre a poça tende a expulsar a parte fundida da junta para trás, fazendo com que o arco entre em contato com uma parte ainda sólida da junta, possibilitando uma maior penetração. Já ao se posicionar a tocha no sentido de empurrar a poça de fusão, a pressão exercida pelo arco tende a fazer com que este incida sempre sobre uma parte ainda líquida, o que provavelmente proporciona um melhor acabamento do cordão, no entanto com uma menor penetração. Posicionado-se a tocha em ângulo reto, o efeito esperado com relação a penetração é intermediário quando comparado com os outros ângulos (puxando/empurrando).

Tabela 4.6: Condições de soldagem e resultados para os ensaios da Série 7-1

| Teste | Corrente (A) | Ângulo de ataque (°) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|---|
| 7-1-1 | 140 | 105 | 144 | 95% (irregularidade) |
| 7-1-2 | 140 | 115 | 130 | 90% (irregularidades) |
| 7-1-3 | 140 | 115 | 284 | 100% |
| 7-1-4 | 140 | 115 | 286 | 100% |
| 7-1-5 | 140 | 115 | 285 | 100% |
| 7-1-6 | 140 | 105 | 290 | 100% |
| 7-1-7 | 140 | 105 | 290 | 100% |
| 7-1-8 | 140 | 90 | 282 | 0% (irregularidades distribuídas) |
| 7-1-9 | 140 | 75 | 155 | 10% (irregularidades distribuídas) |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura A50 comercial a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1,5 s; Rampa de velocidade: 2,5 s; Velocidade de soldagem: 930 mm/min.*

Nos testes realizados com ângulos de posicionamento da tocha no sentido de empurrar a poça de fusão, ângulos de 115º e 105º, verificou-se a ocorrência de cordões conformes, bem como a repetibilidade desejada. É importante se destacar que nos dois primeiros testes (7-1-1 e 7-1-2) ainda havia alguma irregularidade. No entanto, verificou-se que durante o movimento da tocha estava havendo uma oscilação da velocidade de soldagem (vibração da tocha) em dois pontos. Corrigido este fato, as soldas seguintes (7-1-3 a 7-1-7) tiveram o comportamento estável. Deve-se observar também que ao se inclinar a tocha tem-se um maior comprimento do arco (para uma inclinação de 105º ocorre uma incidência maior do arco sobre a junta a ser soldada do que para uma inclinação de 115º). Já ao se posicionar a tocha com um ângulo no sentido de puxar a poça de fusão (75º), observou-se novamente a não conformidade dos cordões. Esse fato também aconteceu ao se posicionar a tocha em ângulo reto (90º).

A próxima série de testes (série 7-2), cujos resultados estão na Tabela 4.7, teve como objetivo verificar o limite de velocidade para uma inclinação de 105º.

Tabela 4.7: Condições de soldagem e resultados para os ensaios da Série 7-2

| Teste | Velocidade (mm/min) | Ângulo de ataque (°) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|---|
| 7-2-1 | 930 | 105 | 290 | 100% |
| 7-2-2 | 1010 | 105 | 290 | 100% |
| 7-2-3 | 1180 | 105 | 292 | 0% (irregularidades distribuídas) |
| 7-2-4 | 1100 | 105 | 240 | 60% (irregularidades distribuídas) |
| 7-2-5 | 1050 | 105 | 288 | 100% |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura A50 comercial a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1,5 s; Rampa de velocidade: 2,5 s; Corrente de soldagem: 140 A.*

Verificou-se que, para as velocidades de soldagem de 930 até 1050 mm/min, ocorreram cordões com 100% de aceitabilidade, ou seja, ocorreram cordões totalmente conformes. Lembrando que na série 7-1 também ocorreram cordões conformes com uma velocidade de 1000 mm/min, pode-se dizer que a velocidade limite para esta junta, a uma corrente de 140 A e demais condições constantes, é de 1050 mm/min.

Vale lembrar que de acordo com os estudos de Shneerson & Bykhovskii (1980), mostrados no segundo capítulo, a corrente de soldagem máxima que se pode utilizar sem a ocorrência de defeitos cai quando a tocha é posicionada fora da posição horizontal (empurrando ou puxando) apesar de que, de acordo com os testes até agora realizados, a inclinação da tocha no sentido de empurrar favorece a estabilidade do processo.

### 4.2.4 Influência do material de base

Como mencionado anteriormente, o aço inoxidável é considerado um material de melhor soldabilidade pelo processo a plasma. A razão para tal é a menor presença de impurezas no material. Outra hipótese estaria relacionada com a tensão superficial/viscosidade da poça. A próxima série de testes (Série 8-1) teve como objetivo verificar se a não presença de impurezas e/ou valor da tensão superficial/viscosidade da poça pode proporcionar maior aceitabilidade/repetibilidade na soldagem, bem como afetar o limite máximo para a velocidade de soldagem. Para isto foram utilizadas chapas de testes (dobradas em aresta) feitas com aço inoxidável AISI 304, da mesma espessura (1,5 mm) das chapas de aço ao carbono até agora utilizadas. Os resultados desta nova série de testes são apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Condições de soldagem e resultados para os ensaios da Série 8-1

| Teste | Velocidade (mm/min) | Retardo (s) | Rampa de velocidade (s) | Ângulo de ataque (°) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 8-1-1 | 1050 | 1,5 | 2,5 | 105 | 260 | 100% |
| 8-1-2 | 1140 | 0,75 | 2,5 | 105 | 140 | 100% |
| 8-1-3 | 1350 | 0,1 | 1,0 | 105 | 140 | 100% |
| 8-1-4 | 1600 | 0,1 | 0,8 | 105 | 150 | 100% |
| 8-1-5 | 2180 | 0,05 | 0,8 | 105 | 125 | 100% |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura A50 comercial a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Ângulo de ataque: 105°; Ângulo de ataque: 105°; Corrente de soldagem: 140 A.*

Notou-se que para este tipo de material os valores de retardo e rampa de velocidade utilizados até então não proporcionaram bons inícios de cordão, pois ocorria excesso de fusão, de certo devido à baixa capacidade de conduzir calor do aço inoxidável. Tentou-se, então, ao mesmo tempo em que se verificava a aceitabilidade dos cordões de solda, encontrar também

um par de parâmetros (retardo e rampa de velocidade) que levasse a cordões inteiramente conformes.

A soldagem em aço inoxidável mostrou-se ser bastante eficiente. Foram obtidos cordões totalmente conformes a velocidades de até 2180 mm/min, o que é excelente do ponto de vista da produtividade do processo. Confirmou-se, então, que a não presença de impurezas no material a ser soldado, bem como as propriedades físico-químicas deste material, são características que minimizaram sensivelmente a possibilidade de perturbação da poça de fusão, o que foi determinante na qualidade (aceitabilidade/repetibilidade) dos cordões de solda. Foi feita ainda uma série de testes (Série 8-2), cujos resultados são apresentados na Tabela 4.9, com a tocha em ângulo de ataque de 90º, isso para verificar a influência do uso desta posição de soldagem no aço inoxidável.

Tabela 4.9: Condições de soldagem e resultados para os ensaios da Série 8-2

| Teste | Velocidade (mm/min) | Retardo (s) | Rampa de velocidade (s) | Ângulo de ataque (°) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 8-2-1 | 1350 | 1 | 1 | 90 | 140 | 100% |
| 8-2-2 | 1760 | 0,1 | 0,8 | 90 | 140 | 100% |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura A50 comercial a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Ângulo de ataque: 90°; Corrente de soldagem: 140 A.*

Notou-se que, mesmo utilizando um ângulo de ataque de 90º foram obtidos excelentes resultados. Foi possível imprimir velocidades de soldagem de 1350 e até 1760 mm/min, sem que, no entanto, ocorressem irregularidades como aquelas das séries de testes realizadas com aço carbono. Não se verificou se existiria a tendência de se ter menores velocidades de soldagem quando o ângulo de ataque da tocha é de 90º.

### 4.2.5 Influência da limpeza e da forma de união das juntas

Esta fase de testes teve como objetivo verificar se o ângulo de ataque de 105º poderia superar os problemas de irregularidade do cordão identificados quando das soldagens com as juntas fixadas utilizando o processo de soldagem por resistência ou sem limpeza. Isso porque no item 3.3.3 do terceiro capítulo foi mencionado que a maioria das descontinuidades iniciava-se sobre os pontos de solda por resistência, mas as soldas eram feitas com ângulo de ataque igual a 90º. Também no terceiro capítulo verificou-se que a presença de oxigênio (carepas ou óxidos na superfície da chapa) favorece a ocorrência da irregularidade. A Tabela 4.10 apresenta os resultados da primeira série (série 9-1) desta nova fase de testes.

Tabela 4.10: Condições de soldagem e resultados para os ensaios da Série 9-1

| Teste | Retardo (s) | Rampa de velocidade (s) | Ângulo de ataque (°) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|---|---|
| 9-1-1 | 1,5 | 2,5 | 105 | 280 | 75% (porosidade distribuída) |
| 9-1-2 | 1 | 2,5 | 105 | 280 | 85% (porosidade distribuída) |
| 9-1-3 | 0,5 | 1 | 105 | 275 | 95% (excesso de fusão no início) |
| 9-1-4 | 0,05 | 1 | 105 | 130 | 75% (aspecto rugoso) |
| 9-1-5 | 0,05 | 1 | 105 | 140 | 70% (aspecto rugoso) |
| 9-1-6 | 0,05 | 1 | 105 | 285 | 75% (irregularidades nos pontos) |
| 9-1-7 | 0,05 | 1 | 105 | 285 | 75% (irregularidades nos pontos) |
| 9-1-8 | 0,05 | 1 | 105 | 285 | 100% |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura A50 comercial a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Velocidade de soldagem: 1050 mm/min; Ângulo de ataque: 105°; Corrente de soldagem: 140 A;*

Nos testes 9-1-1 e 9-1-2 também não se levou em conta a limpeza das juntas, isso para se verificar novamente a influência da presença de óxidos na qualidade dos cordões. Como esperado, nestes testes ocorreram cordões não conformes devido a presença destes óxidos. Tais óxidos levaram, inclusive, à presença de porosidade nos cordões de solda, o que ressalta a grande importância de se efetuar uma limpeza eficiente das juntas antes de efetuar a soldagem, fato já mencionado pela AGA (19??).

Para os testes seguintes realizou-se uma limpeza das juntas (escovamento mecânico) para retirar os óxidos e demais impurezas que pudessem ser prejudiciais à soldagem. De acordo com os testes 9-1-3, 9-1-4, 9-1-5, 9-1-6 e 9-1-7 notou-se que nos pontos de solda por resistência ocorreram irregularidades, mesmo impondo-se um ângulo de inclinação à tocha de soldagem (empurrando). Isso confirma que a oxidação presente nos pontos de solda foi um fator determinante para a não conformidade dos cordões, suplantando o efeito positivo do ângulo de ataque da tocha.

Foi feito ainda um teste complementar (teste 9-1-8) com a junta livre dos pontos de solda por resistência e sim fixada mecanicamente por meio do suporte. Verificou-se o esperado, um cordão de solda totalmente conforme como os cordões que ocorreram nos testes expostos no item 4.2.3 deste capítulo.

### 4.2.6 Otimização do programa de movimento da mesa de coordenadas

Na série de testes 8-1 (soldagem de aço inoxidável) foi verificado um excelente resultado quanto à aceitabilidade do cordão mesmo se utilizando uma velocidade de soldagem tão alta como 2180 mm/min. Como o programa de movimento da mesa de coordenadas foi desenvolvido para operar em velocidades entre 50 e 2500 mm/min, o mesmo foi modificado

para operar a velocidades mais elevadas, visando à possibilidade de, em testes futuros, utilizar velocidades de soldagem mais elevadas. Assim foram implementadas e testadas modificações no programa de movimento da mesa de coordenadas, de forma a possibilitar a operação em velocidades de até 3500 mm/min.

Após essas modificações, foi realizada uma nova calibração para o eixo X da mesa de coordenadas. A relação entre a velocidade digitada no programa e a velocidade de operação da mesa passou a ser expressa pela seguinte equação:

$$y = 1E^{-11}x^4 - 8E^{-8}x^3 + 0.0002x^2 + 0.8801x + 5.0158 \quad (R^2 = 0.9994) \qquad (4.1),$$

onde: y = velocidade digitada no programa
x = velocidade de operação da mesa e
$R^2$ = coeficiente de correlação

**4.3 Conclusões**

A partir das várias séries de testes realizadas neste capítulo chegou-se às seguintes conclusões:

- Ângulos de ataque maiores que 90º (empurrando), uma limpeza eficiente da junta a ser soldada e o uso de um gás de plasma adequado são condições determinantes para a produção de cordões conformes na soldagem a plasma de aço ao carbono;
- O aço inoxidável demonstrou possuir uma soldabilidade do ponto de vista operacional bem melhor que a do aço ao carbono.

Chegou-se ainda a uma condição adequada de soldagem, que é definida por:

- Ângulo de ataque: 105º (empurrando);
- Gás de plasma: Mistura A50 comercial a uma vazão de 0,7 l/min;
- Gás de proteção: Mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min;
- Diâmetro do eletrodo: 5 mm;
- Ângulo da ponta do eletrodo: ≈33°;
- Afastamento do eletrodo: 0,8 mm;
- Distância tocha-peça: 3,5 mm;
- Juntas livres da presença de óxidos e demais impurezas;
- Levar em conta valores de retardo (1,5 s) e de rampa de velocidade (2,5 s).

# Capítulo V

## Determinação de Condições Padrão de Soldagem

### 5.1 Objetivo

Determinar, a partir da condição padrão de soldagem definida no capítulo anterior, quais os limites de velocidade para correntes de soldagem de 100, 120, 140, 160, 180 e 200 A. Desta forma, será possível definir novas condições padrão de soldagem, que servirão como parâmetro de comparação.

### 5.2 Procedimento Experimental

#### 5.2.1 Limites de velocidade de soldagem para as correntes propostas

Para cada série de testes realizada, ou seja, para cada corrente de soldagem testada, foi considerada uma velocidade de soldagem inicial tomando por base os resultados dos testes anteriores. Depois de verificada a condição de aceitabilidade do cordão de solda para cada uma destas velocidades, promoveu-se variação do nível de velocidade, de modo a obter cordões de solda com um nível satisfatório de aceitabilidade. Definiu-se primeiramente o limite inferior de velocidade de soldagem (para velocidades inferiores a esta não ocorrem cordões totalmente conformes devido ao excesso de fusão). Em seguida, o nível de velocidade foi elevado até se alcançar o limite de velocidade superior, isto é, uma velocidade de soldagem máxima que ainda propiciasse um cordão de solda totalmente conforme. Desta forma, nesta fase procurar-se-á determinar, para cada corrente de soldagem proposta, os limites (inferior e superior) de velocidade de soldagem.

A primeira série de testes (Série 10-1) foi realizada com uma corrente de soldagem de 100 A, como mostra a Tabela 5.1. Notou-se que para velocidades de soldagem abaixo de 800 mm/min não ocorreram cordões totalmente conformes (fusão excessiva). Considerando a conformidade e a repetibilidade dos testes 10-1-3 e 10-1-8, a velocidade de 800mm/min foi tomada como limite inferior para a velocidade de soldagem. Verificou-se ainda que, de acordo com os testes 10-1-9 e 10-1-10, o limite superior da velocidade de soldagem foi de 1000 mm/min, também devido à conformidade e a repetibilidade dos testes. É importante também mencionar que o cordão de melhor aspecto e acabamento ocorreu no limite superior da velocidade de soldagem.

Tabela 5.1: Condições de soldagem e resultados para os ensaios da Série 10-1 (I = 100 A)

| Teste | Velocidade (mm/min) | Ângulo de ataque (°) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|---|
| 10-1-1 | 1050 | 105 | 100 | 80% (falta de fusão) |
| 10-1-2 | 950 | 105 | 280 | 100% |
| 10-1-3 | 800 | 105 | 140 | 100% |
| 10-1-4 | 600 | 105 | 90 | 80% (excesso de fusão) |
| 10-1-5 | 650 | 105 | 100 | 85% (excesso de fusão) |
| 10-1-6 | 700 | 105 | 150 | 90% (excesso de fusão) |
| 10-1-7 | 750 | 105 | 140 | 90% (excesso de fusão) |
| 10-1-8 | 800 (limite inferior) | 105 | 130 | 100% |
| 10-1-9 | 1000 | 105 | 130 | 100% |
| 10-1-10 | 1000 (limite superior) | 105 | 100 | 100% |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura A50 comercial a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1 s; Rampa de velocidade: 2,5 s.*

A próxima série de testes (Série 10-2) foi realizada com uma corrente de 120 A, como mostra a Tabela 5.2. Considerando a conformidade do teste 10-2-2, a velocidade de 950 mm/min foi considerada como limite inferior. De acordo com os testes 10-2-5 e 10-2-8, o limite superior de velocidade de soldagem foi assumido como sendo de 1000 mm/min. Novamente o cordão de melhor acabamento ocorreu no limite superior de velocidade.

Tabela 5.2: Condições de soldagem e resultados para os ensaios da Série 10-2 (I = 120 A)

| Teste | Velocidade (mm/min) | Ângulo de ataque (°) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|---|
| 10-2-1 | 1000 | 105 | 130 | 100% |
| 10-2-2 | 950 (limite inferior) | 105 | 95 | 100% |
| 10-2-3 | 900 | 105 | 120 | 95% (excesso de fusão) |
| 10-2-4 | 1200 | 105 | 70 | 100% |
| 10-2-5 | 1550 | 105 | 100 | 100% |
| 10-2-6 | 1700 | 105 | 175 | 75% (irregularidades) |
| 10-2-7 | 1600 | 105 | 140 | 60% (irregularidades) |
| 10-2-8 | 1550 (limite superior) | 105 | 280 | 100% |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura A50 comercial a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1 s; Rampa de velocidade: 2,5 s.*

A próxima série de testes (Série 10-3) foi realizada com uma corrente de soldagem de 140 A como mostra a Tabela 5.3. Considerando a conformidade do teste 10-3-3, a velocidade de 1050 mm/min foi considerada como limite inferior. De acordo com os testes 10-3-5 e 10-3-7, o limite superior de velocidade de soldagem foi de 1700 mm/min, devido à conformidade e a repetibilidade do testes. E mais uma vez, quando se soldou no limite superior de velocidade, ocorreu o cordão de melhor aspecto e acabamento.

Tabela 5.3: Condições de soldagem e resultados para os ensaios da Série 10-3 (I = 140 A)

| Teste | Velocidade (mm/min) | Ângulo de ataque (°) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|---|
| 10-3-1 | 900 | 105 | 80 | 80% (excesso de fusão) |
| 10-3-2 | 1000 | 105 | 80 | 90% (excesso de fusão) |
| 10-3-3 | 1050 (limite inferior) | 105 | 100 | 100% |
| 10-3-4 | 1800 | 105 | 90 | 50% (irregularidades) |
| 10-3-5 | 1700 | 105 | 85 | 100% |
| 10-3-6 | 1750 | 105 | 95 | 95% (irregularidades) |
| 10-3-7 | 1700 (limite superior) | 105 | 285 | 100% |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura A50 comercial a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1 s; Rampa de velocidade: 2,5 s.*

A próxima série de testes (Série 10-4) foi realizada com uma corrente de soldagem de 160 A como mostra a Tabela 5.4. Considerando a conformidade do teste 10-4-3, a velocidade de 1300 mm/min foi considerada como limite inferior. De acordo com os testes 10-4-10 e 10-4-11, o limite superior de velocidade de soldagem foi de 1800 mm/min, devido à conformidade e a repetibilidade do testes. Vale lembrar que mais uma vez os cordões de solda de melhor acabamento resultaram dos testes feitos no limite superior de velocidade.

Tabela 5.4: Condições de soldagem e resultados para os ensaios da Série 10-4 (I = 160 A)

| Testes | Velocidade (mm/min) | Ângulo de ataque (°) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|---|
| 10-4-1 | 1000 | 105 | 90 | 60% (excesso de fusão) |
| 10-4-2 | 1100 | 105 | 90 | 65% (excesso de fusão) |
| 10-4-3 | 1300 (limite inferior) | 105 | 90 | 100% |
| 10-4-4 | 1800 | 105 | 95 | 100% |
| 10-4-5 | 1900 | 105 | 85 | 100% |
| 10-4-6 | 2000 | 105 | 80 | 75% (falta de fusão) |
| 10-4-7 | 1900 | 105 | 130 | 60% (irregularidades) |
| 10-4-8 | 1850 | 105 | 135 | 100% |
| 10-4-9 | 1850 | 105 | 290 | 30% (irregularidades) |
| 10-4-10 | 1800 | 105 | 285 | 100% |
| 10-4-11 | 1800 (limite superior) | 105 | 285 | 100% |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura A50 comercial a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1 s; Rampa de velocidade: 2,5 s.*

A próxima série de testes (Série 10-5) foi realizada com uma corrente de soldagem de 180 A, como mostra a Tabela 5.5. Ao contrário dos ensaios feitos com correntes de soldagem menores, verificou-se, nesta série, a não ocorrência de cordões conformes. Acredita-se que intensidades de corrente muito elevadas impeçam a formação do cordão na dada junta, independentemente da velocidade de soldagem utilizada. Isso vai de encontro ao proposto por

Shneerson & Bykhovskii (1980). Segundo estes autores existe uma dependência, apresentada no segundo capítulo deste presente trabalho (Figura 2.7), entre a corrente de soldagem máxima permissível e a espessura do metal de base para uma dada velocidade de soldagem. A partir deste valor de corrente não é mais possível obter cordões isentos de defeitos do tipo "dente de serra" (formação de ondulações), ou seja, sem irregularidades. Dessa forma, para a corrente de 180 A não foi possível, com essas condições, determinar os limites de velocidade.

Tabela 5.5: Condições de soldagem e resultados para os ensaios da Série 10-5 (I = 180 A)

| Teste | Velocidade (mm/min) | Ângulo de ataque (°) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|---|
| 10-5-1 | 1500 | 105 | 100 | 80% (excesso de fusão) |
| 10-5-2 | 1600 | 105 | 90 | 75% (excesso de fusão) |
| 10-5-3 | 1700 | 105 | 80 | 90% (excesso de fusão) |
| 10-5-4 | 2000 | 105 | 100 | 40% (irregularidades) |
| 10-5-5 | 1950 | 105 | 160 | 85% (irregularidades) |
| 10-5-6 | 1950 | 105 | 130 | 40% (irregularidades) |
| 10-5-7 | 1900 | 105 | 140 | 95% (irregularidades) |
| 10-5-8 | 1850 | 105 | 285 | 20% (irregularidades) |
| 10-5-9 | 1800 | 105 | 285 | 75% (irregularidades) |
| 10-5-10 | 1750 | 105 | 140 | 30% (irregularidades) |
| 10-5-11 | 1700 | 105 | 125 | 40% (irregularidades) |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura A50 comercial a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1 s; Rampa de velocidade: 2,5 s.*

A próxima série de testes (Série 10-6) foi realizada com uma corrente de soldagem de 200 A como mostra a Tabela 5.6. Verificou-se, também nesta série, a não ocorrência de cordões conformes, o que reforça a tese de que intensidades de corrente muito elevadas impedem a formação de cordões conformes para a dada junta, independentemente da velocidade de soldagem. Dessa forma, também não foi possível para a corrente de 200 A determinar os limites de velocidade, pelo menos com essas condições de soldagem.

Tabela 5.6: Condições de soldagem e resultados para os ensaios da Série 10-6 (I = 200 A)

| Teste | Velocidade (mm/min) | Ângulo de ataque (°) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|---|
| 10-6-1 | 2000 | 105 | 140 | 40% (irregularidades) |
| 10-6-2 | 1800 | 105 | 130 | 30% (irregularidades) |
| 10-6-3 | 2100 | 105 | 150 | 40% (irregularidades) |
| 10-6-4 | 2300 | 105 | 110 | 50% (irregularidades) |
| 10-6-5 | 2300 | 105 | 280 | 50% (irregularidades) |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura A50 comercial a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1 s; Rampa de velocidade: 2,5 s.*

Como tentativa de se encontrar os limites de velocidades de soldagem para correntes maiores do que 180 A, aumentou-se o ângulo de ataque da tocha de soldagem para 115º (Série 10-7). Pode-se observar na Tabela 5.7 uma melhoria no desempenho da soldagem, pois, alcançou-se um cordão totalmente conforme no teste 10-7-5. No entanto, não se conseguiu repetibilidade, como mostra o teste 10-7-6.

Tabela 5.7: Condições de soldagem e resultados para os ensaios da Série 10-7 (I = 180 A)

| Teste | Velocidade (mm/min) | Ângulo de ataque (°) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|---|
| 10-7-1 | 1700 | 115 | 80 | 80% (excesso de fusão) |
| 10-7-2 | 1800 | 115 | 80 | 90% (excesso de fusão) |
| 10-7-3 | 2000 | 115 | 100 | 70% (excesso de fusão) |
| 10-7-4 | 1900 | 115 | 145 | 85% (excesso de fusão) |
| 10-7-5 | 1950 | 115 | 140 | 100% |
| 10-7-6 | 1950 | 115 | 280 | 90% (irregularidades) |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura A50 comercial a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1 s; Rampa de velocidade: 2,5 s.*

Considerando que um pequeno aumento no ângulo de ataque não tenha sido suficiente para eliminar as irregularidades, decidiu-se aumentá-lo ainda mais, para 135º como mostra a Tabela 5.8 (Série de testes 10-8). Novamente verificou-se a não ocorrência de cordões conformes. Após uma melhor análise dos resultados desta série de testes, notou-se a presença de poros sobre os cordões de solda. Essa porosidade foi provavelmente provocada pelo aumento excessivo do ângulo de ataque - com ângulos de ataque mais acentuados, o gás de proteção é direcionado muito à frente da região fundida, ficando a parte posterior da poça sem proteção gasosa, o que causa oxidação do material. Assim, caso seja necessário usar velocidades de soldagens muito elevadas e/ou impor maiores ângulos de ataque, sugere-se melhorar a proteção na parte posterior da poça, o que poderia, por exemplo, ser feito adaptando uma injeção de fluxo por trás da tocha de soldagem.

Tabela 5.8: Condições de soldagem e resultados para os ensaios da Série 10-8 (I = 180 A)

| Teste | Velocidade (mm/min) | Ângulo de ataque (°) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|---|
| 10-7-1 | 1950 | 135 | 280 | 70% (irregularidades) |
| 10-7-2 | 1800 | 135 | 280 | 30% (irregularidades) |
| 10-7-3 | 2000 | 135 | 280 | 30% (irregularidades) |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura A50 comercial a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1 s; Rampa de velocidade: 2,5 s.*

Como não foi possível determinar condições padrão de soldagem para as correntes de 180 e 200 A, acredita-se na existência de um limite de corrente em função da espessura das chapas e formato da junta, acima do qual não se consegue soldar, algo já demonstrado por Shneerson & Bykhovskii (1980). A Figura 5.1 demonstra que a efetividade do aumento da velocidade limite de soldagem em relação ao aumento da corrente é desacelerada no sentido das maiores correntes, corroborando também a idéia de que em correntes mais elevadas não haveria condições de soldagem.

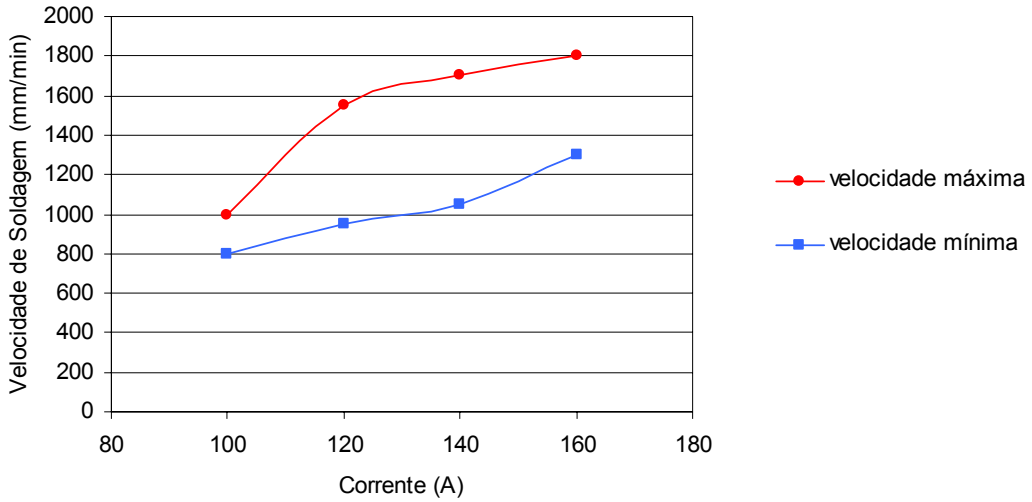



Figura 5.1: Relação entre a corrente de soldagem e as velocidades de soldagem limites

Finalmente, é importante ressaltar que a corrente de soldagem de 140 A foi a que proporcionou o melhor aspecto de cordão, apesar de que se conseguiu maiores velocidades de soldagem com a corrente de 160 A.

### 5.2.2 Verificação da dificuldade de acendimento do arco

Foi verificado nesta etapa de trabalho que a abertura do arco se torna mais difícil com o uso da mistura A50 comercial como gás de plasma, que, por sua vez, mostrou-se mais adequada para a soldagem de aço ao carbono do que o Argônio puro. A presença do aditivo junto ao Argônio torna o potencial de ionização da mistura mais elevado, necessitando-se de maior tensão para a abertura do arco. Essa dificuldade pode ser contornada diminuindo-se a distância tocha-peça no momento do acendimento (experimentalmente, comprovou-se a eficácia desta técnica com o auxílio de uma chapa colocada entre o bocal e a peça).

Como outras propostas de solução para o problema de acendimento do arco, podem ser efetuadas as seguintes operações:

- No caso de sistemas de soldagem robotizados, pode se aproximar e afastar a tocha da peça no momento do acendimento do arco, o que é muito simples do ponto de vista operacional;
- Pode-se modificar o equipamento de soldagem para operar com uma tensão em vazio mais elevada, o que facilita o acendimento do arco;
- Apesar de mais complexa, uma outra solução seria usar um sistema de distribuição de gás que possibilitasse um desvio de fluxo de tal forma que no momento de acendimento do arco fosse usado Argônio puro como gás de plasma e logo em seguida permitisse retornar a operar com a mistura A50 comercial.

## 5.3 Conclusões

A partir das várias séries de testes realizadas, chegou-se às seguintes conclusões:

- Existe uma relação entre a corrente e a faixa de velocidade de soldagem na qual se consegue cordões em conformidade - quanto maior a corrente, maior o teto da faixa (maior produtividade);
- Os valores de teto desta faixa são altos o suficiente (1000 a 1800 mm/min para uma variação de 100 a 160 A) para justificar o uso da soldagem a plasma “melt-in” na prática para esta aplicação;
- Existe também um limite máximo para a corrente, independentemente da velocidade, com o qual se consegue cordões em conformidade. Provavelmente este limite está vinculado a uma dada geometria de junta e espessura de material;
- Os cordões de solda de melhor aspecto e acabamento ocorrem nos limites superiores de velocidade de soldagem;
- O uso de maiores velocidades de soldagem pode requerer uma melhor proteção da poça de fusão (parte posterior), que pode ser feita adaptando-se uma injeção de fluxo de gás na tocha de soldagem.
- O uso da mistura A50 comercial como gás de plasma dificulta a abertura do arco, mas existem técnicas, com facilidade operacional, para contornar estes problemas;

# Capítulo VI

## Determinação das Condições Padrão para Juntas Sobrepostas

### 6.1 Objetivo

Determinar uma condição padrão para soldagem a plasma de aço comum ao carbono, em juntas sobrepostas, conforme Figura 6.1, visando a otimização e determinação da faixa de tolerância de ajuste dos parâmetros.

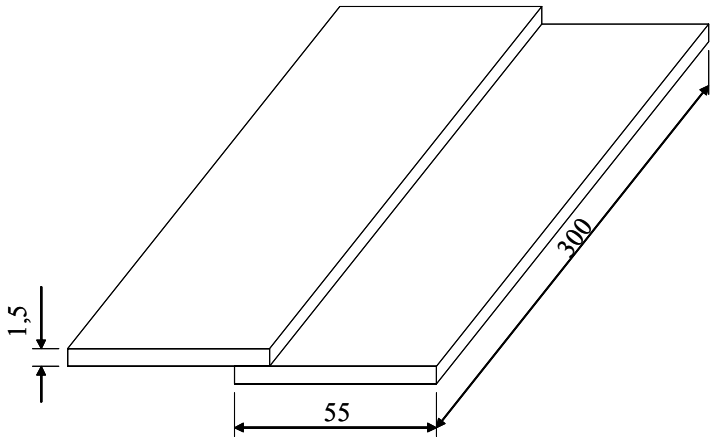



Figura 6.1: Tipo de junta e dimensões (mm) do corpo de prova (sobreposição de 10 a 15 mm)

### 6.2 Soldagem dos corpos de prova e avaliação dos resultados

Para garantir que a junta dos corpos de prova não se abrisse durante a soldagem, as chapas foram rigidamente fixadas em um suporte, como mostra a Figura 6.2.

Figura 6.2: Suporte de fixação do corpo de prova

### 6.2.1 Determinação de uma faixa de velocidade de soldagem

Procurou-se, utilizando uma corrente de soldagem de 140 A, variar a velocidade de soldagem a partir de 1200 mm/min, para se determinar a faixa de velocidade que apresentasse cordões aceitáveis (aspecto visual, baseado na regularidade e integridade do cordão). A Tabela 6.1 apresenta as condições dos testes, bem como os resultados com relação à aceitabilidade dos cordões para a série de testes 11-1.

Para fazer com que o arco incidisse de maneira mais uniforme sobre a junta, a tocha de soldagem foi posicionada com ângulo de ataque de 105º e ângulo de trabalho de 75º (Figura 6.3).

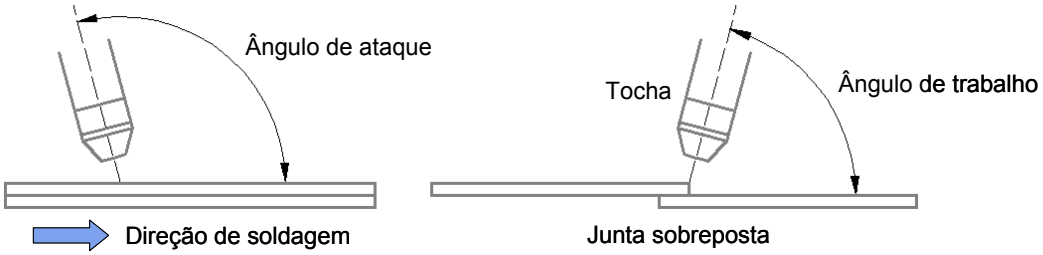



Figura 6.3: Ângulo de ataque e ângulo de trabalho

Tabela 6.1: Resultados da série 11-1 (ângulo de ataque: 105º; ângulo de trabalho: 75º)

| Teste | Corrente (A) | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|---|
| 11-1-1 | 140 | 1200 | 90 | 0% (falta de fusão) |
| 11-1-2 | 140 | 900 | 90 | 0% (falta de fusão e irregularidades) |
| 11-1-3 | 140 | 1000 | 140 | 0% (falta de fusão e irregularidades) |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura A50 comercial a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1 s; Rampa de velocidade: 2,5 s.*

Verificou-se durante os testes que o arco de soldagem oscilava sobre a junta, não conseguindo manter uma posição estável de incidência. Tal fato, provavelmente, fez com que não ocorressem cordões conformes, como mostra a Figura 6.4.

Falta de fusão  Irregularidades

Figura 6.4: Trechos de cordões não conformes em juntas sobrepostas

Como forma de tentar eliminar o problema de oscilação do arco durante a soldagem, a distância entre o bocal e a peça foi reduzida de 3,5 para 1 mm. Acredita-se que uma redução nesse parâmetro faz com que o arco se torne mais rígido, de forma a minimizar as oscilações deste sobre a junta. A Tabela 6.2 mostra os resultados dos testes realizados após a alteração deste parâmetro (Série 11-2). Notou-se que o fato de apenas reduzir a distância entre o bocal e a peça não foi suficiente para manter o arco rigidamente posicionado sobre a junta.

Tabela 6.2: Resultados da série 11-2 (ângulo de ataque: 105º; ângulo de trabalho: 75º)

| Teste | Corrente (A) | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|---|
| 11-2-1 | 140 | 1000 | 140 | 0% (falta de fusão) |
| 11-2-2 | 160 | 1200 | 140 | 0% (falta de fusão e irregularidades) |
| 11-2-3 | 160 | 1100 | 140 | 0% (falta de fusão e irregularidades) |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura A50 comercial a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: $\approx 33°$; Distância da tocha à peça: 1 mm; Retardo: 1 s; Rampa de velocidade: 2,5.*

De maneira a aumentar ainda mais a rigidez do arco e, conseqüentemente, assegurar que este incidisse sobre a posição correta da junta, a distância entre o bocal e a peça foi mantida em 1 mm e o afastamento do eletrodo foi aumentado de 0,8 para 1,5 mm. Um aumento no recuo do eletrodo provavelmente aumenta, de forma ainda mais acentuada, a rigidez e a concentração do arco, já que o uso de maiores recuos, conforme indica a revisão de Richetti (2003), favorece a formação de arcos mais colimados. Os resultados obtidos a partir desta alteração são mostrados na Tabela 6.3 (série de testes 11-3).

Tabela 6.3: Resultados da série 11-3 (ângulo de ataque: 105º; ângulo de trabalho: 75º)

| Teste | Corrente (A) | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|---|
| 11-3-1 | 160 | 1200 | 140 | 0% (falta de fusão e irregularidade) |
| 11-3-2 | 160 | 800 | 130 | 50% (falta de fusão) |
| 11-3-3 | 160 | 700 | 150 | 100% |
| 11-3-4 | 160 | 700 | 120 | 100% |
| 11-3-5 | 160 | 700 | 280 | 100% |
| 11-3-6 | 160 | 700 | 260 | 100% |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura A50 comercial a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 1,5 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: $\approx 33°$; Distância da tocha à peça: 1 mm; Retardo: 2,5 s; Rampa de velocidade: 2,5.*

Verificou-se realmente que, utilizando uma menor distância entre o bocal e a peça e um maior afastamento do eletrodo, fez-se com que o arco incidisse sobre a posição correta na junta durante toda a soldagem. Assim foi possível obter, embora a um menor nível de velocidade, cordões de solda em conformidade (Figura 6.5), como mostraram os testes 11-3-3, 11-3-4, 11-3-5, e 11-3-6.

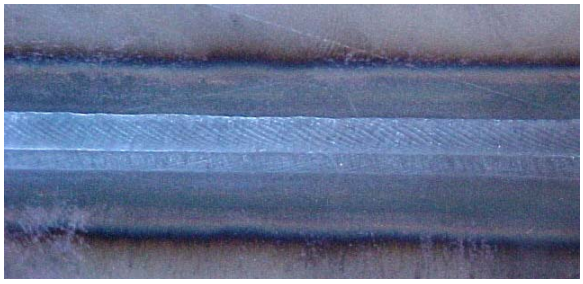


Figura 6.5: Trecho de cordão conforme

Uma vez assegurado que a posição de incidência do arco sobre a peça fosse constante ao longo da junta, na próxima série de testes (série 11-4), como mostra a Tabela 6.4, foi verificada a influência do ângulo de trabalho na aceitabilidade dos cordões de solda, bem como a posição ótima de incidência do arco sobre a junta para garantir melhor aceitabilidade dos cordões. Foram testadas quatro inclinações (ângulos de trabalho de 75º, 45º, 90º e 105º medidos conforme a Figura 6.3) e variada a posição de incidência do arco transversalmente em relação à junta (A: sobre a chapa superior; B: sobre a aresta da chapa superior; e C: na raiz da junção), como mostra a Figura 6.6.

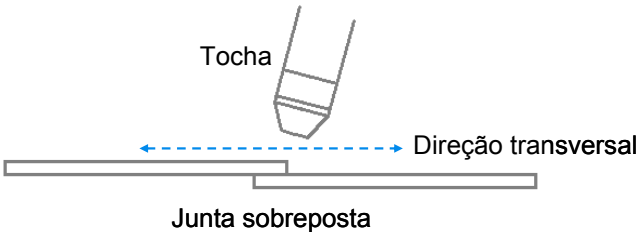



Figura 6.6: Variação transversal da posição de incidência do arco sobre a junta

Tabela 6.4: Resultados da série 11-4 (ângulo de ataque: 105º; ângulo de trabalho: variável; posição transversal: variável: A - sobre a chapa superior, B - sobre a aresta da chapa superior e C - na raiz da junção)

| Teste | Corrente (A) | Velocidade (mm/min) | Ângulo de trabalho (º) | Posição transversal | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 11-4-1 | 160 | 700 | 75 | B | 280 | 100% |
| 11-4-2 | 160 | 700 | 75 | B | 280 | 60% (falta de fusão) |
| 11-4-3 | 160 | 700 | 45 | C | 190 | 30% (falta de fusão e irregularidades) |
| 11-4-4 | 160 | 700 | 90 | B | 270 | 40% (falta de fusão e irregularidades) |
| 11-4-5 | 160 | 700 | 75 | A | 280 | 100% |
| 11-4-6 | 160 | 700 | 105 | A | 180 | 0% (irregularidades) |
| 11-4-7 | 160 | 600 | 105 | A | 80 | 0% (irregularidades) |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura A50 comercial a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 1,5 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 1 mm; Retardo: 2,5 s; Rampa de velocidade: 2,5*

O melhor ângulo de trabalho para a dada junta (espessura e material das chapas) foi o de 75º. Com relação ao posicionamento transversal da tocha de soldagem em relação à junta, o melhor resultado foi alcançado posicionando a tocha de tal modo que o arco incidisse sobre a aresta da chapa superior da junta, como ilustra esquematicamente a Figura 6.7.

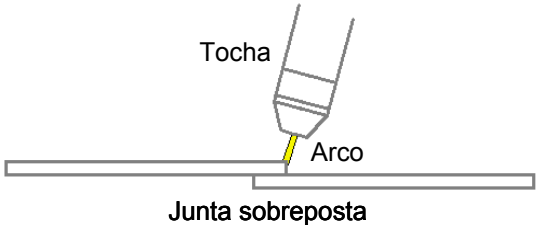



Figura 6.7: Arco posicionado (apontado) sobre a aresta da chapa superior da junta

Após a realização destas séries de testes, notou-se que a corrente de 160 A, apesar de ter contribuído para a obtenção de cordões conformes, fez com que o arco de soldagem atravessasse a junta (penetração excessiva), resultando numa raiz de solda com excesso de fusão, como a mostrada na Figura 6.8.

Figura 6.8: Raiz de solda resultante da penetração excessiva do arco sobre a junta

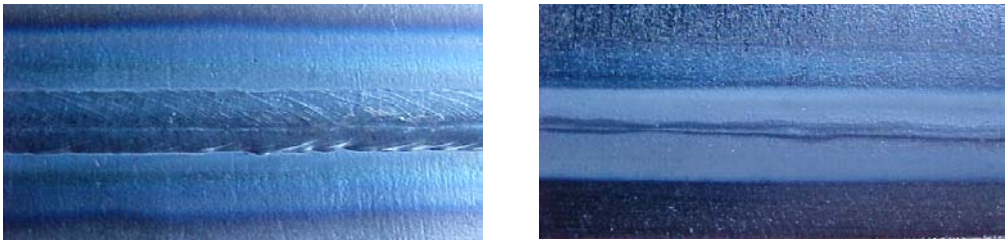
Como forma de tentar evitar este inconveniente (excesso de fusão na raiz), uma nova série de testes (série 11-5) foi realizada com ligeira redução na corrente de soldagem. Além disso, tentou-se comprovar a eficiência dos ajustes dos parâmetros de soldagem requeridos para a formação de cordões totalmente aceitáveis quanto à conformidade. A Tabela 6.5 apresenta os resultados para esta nova série de testes.

Tabela 6.5: Resultados da série 11-5 (ângulo de ataque: 105º; ângulo de trabalho: 75º - sobre a aresta da chapa superior)

| Teste | Corrente (A) | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|---|
| 11-5-1 | 150 | 700 | 140 | 95% (falta de fusão) |
| 11-5-2 | 150 | 700 | 280 | 85% (falta de fusão) |
| 11-5-3 | 155 | 700 | 280 | 100% |
| 11-5-4 | 155 | 700 | 110 | 100% |
| 11-5-5 | 155 | 700 | 160 | 100% |
| 11-5-6 | 155 | 700 | 280 | 100% |
| 11-5-7 | 160 | 700 | 280 | 100% |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura A50 comercial a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 1,5 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 1 mm; Retardo: 2,5 s; Rampa de velocidade: 2,5.*

A princípio, a corrente de soldagem foi reduzida para 150 A, o que não gerou, a uma velocidade de 700 mm/min, fusão completa da junta (testes 11-5-1 e 11-5-2). No teste 11-5-3, mantendo a velocidade de 700 mm/min, a corrente foi elevada para 155 A, fato que garantiu que as chapas se unissem de maneira correta, sem, no entanto, que o arco atravessasse a junta, como ilustra a Figura 6.9. Em seguida, os três testes subseqüentes mostraram a repetibilidade dessas condições. Por fim, foi feito mais um teste com a corrente de 160 A, confirmando os resultados obtidos outrora com esse ajuste.



Face do cordão Raiz do cordão

Figura 6.9: Trecho de cordão em total conformidade

### 6.2.2 Limites de velocidade para correntes de 145, 155 e 165 A

Nesta fase, para cada série de testes realizada, ou seja, para cada corrente de soldagem testada, foi considerada uma velocidade de soldagem inicial tomando por base os resultados dos testes anteriores. Depois de verificada a condição de aceitabilidade do cordão de solda para cada uma destas velocidades, promoveu-se a variação do nível de velocidade, de modo a obter cordões de solda com um nível satisfatório de aceitabilidade. Definiu-se tanto o limite inferior de velocidade de soldagem (para velocidades inferiores a esta não ocorrem cordões totalmente conformes), como o limite de velocidade superior, isto é, a velocidade de soldagem máxima que ainda propiciasse cordões de solda totalmente conformes. Desta forma, nesta fase procurou-se determinar, para cada corrente de soldagem proposta, os limites (inferior e superior) de velocidade de soldagem.

A primeira série de testes (série 11-6) foi realizada com uma corrente de soldagem de 145 A, como mostra a Tabela 6.6. Notou-se que para velocidades de soldagem abaixo de 550 mm/min não ocorreram cordões totalmente conformes (fusão excessiva na raiz). Verificou-se ainda que, de acordo com os testes 11-6-3 e 11-6-6, o limite superior da velocidade de soldagem foi de 650 mm/min, devido à conformidade e repetibilidade dos testes.

Tabela 6.6: Resultados de série de testes 11-6 (ângulo de ataque: 105º; ângulo de trabalho: 75º sobre a aresta da chapa superior)

| Teste | Corrente (A) | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|---|
| 11-6-1 | 145 | 700 | 280 | 0% (falta de fusão e irregularidades) |
| 11-6-2 | 145 | 600 | 130 | 100% |
| 11-6-3 | 145 | 650 | 140 | 100% |
| 11-6-4 | 145 | 550 | 140 | 100% |
| 11-6-5 | 145 | 700 | 130 | 0% (falta de fusão e irregularidades) |
| 11-6-6 | 145 | 650 | 280 | 100% |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura A50 comercial a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 1,5 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 1 mm; Retardo: 2,5 s; Rampa de velocidade: 2,5.*

A próxima série de testes (série 11-7) foi realizada com uma corrente de soldagem de 155 A, como mostra a Tabela 6.7. Considerando a conformidade do teste 11-7-2, a velocidade de 550 mm/min foi considerada como limite inferior para a velocidade de soldagem. Já o limite superior de velocidade de soldagem, de acordo com os testes 11-7-1 e 11-7-3, foi de 700 mm/min.

Tabela 6.7: Resultados da série 11-7 (ângulo de ataque: 105º; ângulo de trabalho: 75º - sobre a aresta da chapa superior)

| Teste | Corrente (A) | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|---|
| 11-7-1 | 155 | 700 | 140 | 100% |
| 11-7-2 | 155 | 550 | 120 | 100% |
| 11-7-3 | 155 | 700 | 130 | 100% |
| 11-7-4 | 155 | 750 | 140 | 100% |
| 11-7-5 | 155 | 800 | 140 | 30% (falta de fusão e irregularidades) |
| 11-7-6 | 155 | 750 | 140 | 30% (falta de fusão e irregularidades) |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura A50 comercial a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 1,5 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 1 mm; Retardo: 2,5 s; Rampa de velocidade: 2,5.*

A próxima série de testes (série 11-8) foi realizada com uma corrente de soldagem de 165 A como mostra a Tabela 6.8. Considerando a conformidade do teste 11-8-7, a velocidade de 600 mm/min foi considerada como limite inferior para a velocidade de soldagem. E de acordo com os testes 11-8-1 e 11-8-6, o limite superior de velocidade de soldagem foi de 700 mm/min, devido à conformidade e a repetibilidade do testes.

Tabela 6.8: Resultados da série 11-8 (ângulo de ataque: 105º; ângulo de trabalho: 75º - sobre a aresta da chapa superior)

| Teste | Corrente (A) | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|---|
| 11-8-1 | 165 | 700 | 140 | 100% |
| 11-8-2 | 165 | 800 | 130 | 90% (falta de fusão) |
| 11-8-3 | 165 | 800 | 130 | 0% (falta de fusão e irregularidades) |
| 11-8-4 | 165 | 750 | 140 | 80% (falta de fusão e irregularidades) |
| 11-8-6 | 165 | 700 | 140 | 100% |
| 11-8-7 | 165 | 600 | 140 | 100% |
| 11-8-8 | 165 | 650 | 130 | 100% |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura A50 comercial a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 1,5 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 1 mm; Retardo: 2,5 s; Rampa de velocidade: 2,5.*

## 6.3 Conclusão

Neste capítulo foi demonstrada a possibilidade de se soldar chapas de aço ao carbono de 1,5 mm de espessura e montadas de forma sobrepostas utilizando o processo a plasma. Entretanto, a Figura 6.10, que apresenta um comparativo com a soldagem de chapas montadas em aresta de mesma espessura (1,5 mm), indica algumas peculiaridades.

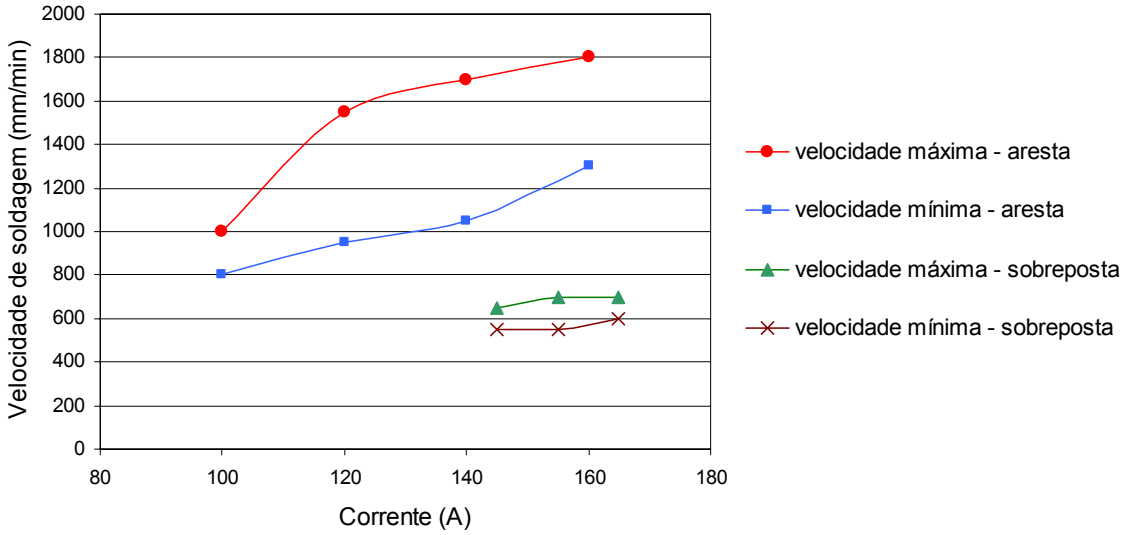



Figura 6.10: Velocidades limites de soldagem para juntas em aresta e sobrepostas

A Figura 6.10 mostra o mesmo comportamento do crescimento das velocidades limites com o crescimento da corrente para juntas sobrepostas, mas as velocidades limites foram bem menores comparativamente àquelas encontradas para correntes semelhantes em juntas em aresta (Capítulo V). Também se nota uma redução na faixa de velocidade em que se consegue soldar com cada corrente, o que confere menor robustez ao processo para juntas sobrepostas.

# Capítulo VII

## Determinação das Condições Padrão para Juntas de Topo

### 7.1 Objetivo

Determinar uma condição padrão para soldagem a plasma de aço comum ao carbono, em juntas de topo, conforme Figura 7.1, usando-se cobre-junta de cobre, visando à otimização e determinação da faixa de tolerância de ajuste dos parâmetros.

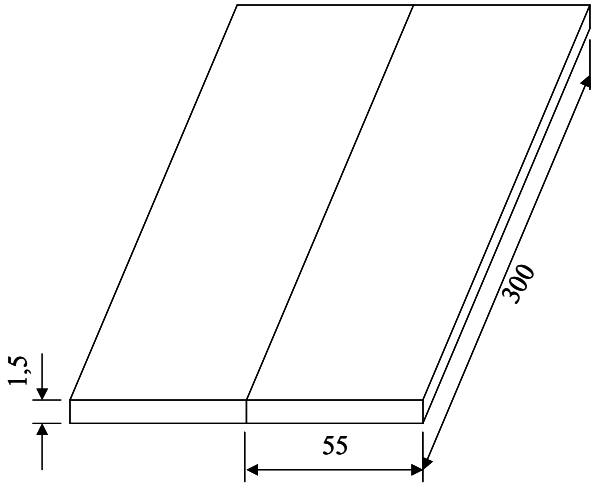



Figura 7.1: Tipo de junta e dimensões (mm) do corpo de prova (esta junta é aplicada sobre cobre-junta de cobre)

### 7.2 Soldagem dos corpos de prova e avaliação dos resultados

Para garantir que a junta dos corpos de prova não se abrisse durante a soldagem, as chapas foram rigidamente fixadas em um suporte, como mostra Figura 7.2.

Figura 7.2: Suporte de fixação do corpo de prova

### 7.2.1 Determinação de uma faixa de velocidade de soldagem

Para a realização dos testes foram mantidos constantes os seguintes parâmetros:

- Gás de proteção: mistura A50 comercial a 10,6 l/min;
- Gás de plasma: mistura A50 comercial a 0,7 l/min;
- Ângulo de ataque: 105º (empurrando);
- Ângulo de trabalho: 90º;
- Distância tocha-peça: 1,5 mm;
- Retardo: 3 s;
- Rampa de velocidade: 3 s;
- Eletrodo EWTh-2 com 5,0 mm de diâmetro;
- Ângulo da ponta do eletrodo: ≈33°;
- Afastamento do eletrodo: 1,5 mm.

Procurou-se, utilizando uma corrente de soldagem de 150 A, variar a velocidade de soldagem para se determinar uma faixa de velocidades que apresentasse cordões aceitáveis (aspecto visual, baseado na regularidade e integridade do cordão de solda). A Tabela 7.1 apresenta os resultados com relação à aceitabilidade dos cordões para a série 12-1 de testes.

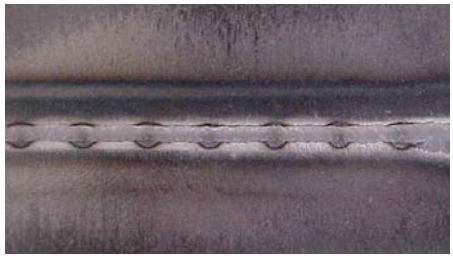
Tabela 7.1: Resultados da série de testes 12-1

| Teste | Corrente (A) | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|---|
| 12-1-1 | 150 | 800 | 140 | 100% |
| 12-1-2 | 150 | 900 | 140 | 80% (perfurações em pontos do cordão) |
| 12-1-3 | 150 | 1000 | 130 | 80% (perfuração no final do cordão) |
| 12-1-4 | 150 | 700 | 140 | 100% |
| 12-1-5 | 150 | 600 | 130 | 100% |
| 12-1-6 | 150 | 600 | 280 | 90% (excesso de penetração e perfuração em um ponto do cordão) |
| 12-1-7 | 150 | 800 | 280 | 90% (falta de penetração) |
| 12-1-8 | 150 | 800 | 280 | 80% (falta de penetração e perfuração em um ponto do cordão) |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura A50 comercial a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 1,5 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 1,5 mm; Retardo: 3 s; Rampa de velocidade: 3 s.*

Iniciou-se esta série utilizando uma velocidade de 800 mm/min, o que proporcionou um excelente resultado - um cordão totalmente conforme, com ótimo aspecto tanto na face quanto na raiz da solda como ilustra a Figura 7.3.

Face do cordão



Raiz do cordão

Figura 7.3: Trecho de cordão totalmente conforme

A velocidade de soldagem foi então elevada para 900 e depois para 1000 mm/min. Apesar de se ter obtido cordões com aspectos tão bons quanto a 800 mm/min, a essas velocidades ocorreram perfurações em alguns pontos do cordão como mostra a Figura 7.4.

Figura 7.4: Detalhe da perfuração no cordão de solda

Com base nesses resultados, a velocidade de soldagem foi reduzida a partir de 800 mm/min. Os resultados foram excelentes, como registram os testes 12-1-4 e 12-1-5, ambos em total conformidade, não ocorrendo, entretanto, repetibilidade nos resultados. Novamente aconteceram perfurações em alguns pontos dos cordões.

Como forma de verificar se as perfurações não ocorreram por alguma contaminação proveniente da escova de aço utilizada para limpeza das chapas, realizou-se uma nova série de testes (série 12-2). Nesta série as chapas foram limpas através de jateamento com areia e em seguida com HCl a 50% de concentração (ácido clorídrico 6 Molar)(teste 12-2-1) ou com álcool etílico hidratado (teste 12-2-2). A Tabela 7.2 mostra os resultados para esta série de testes.

Tabela 7.2: Resultados da série de testes 12-2

| Teste | Corrente (A) | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|---|
| 12-2-1 | 150 | 700 | 280 | 100% |
| 12-2-2 | 150 | 700 | 280 | 90% (perfurações no final do cordão) |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura A50 comercial a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 1,5 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 1,5 mm; Retardo: 3 s; Rampa de velocidade: 3 s.*

Como mostram os testes 12-2-1 e 12-2-2, ocorreu o mesmo inconveniente da série 12-1, ou seja, obteve-se cordões de solda de ótimo aspecto, mas novamente ocorreram perfurações em alguns pontos. Notou-se que as perfurações ocorreram exatamente nas posições dos furos feitos no cobre-junta que são utilizados para purga. Verificou-se ainda que este fato também ocorreu na série de testes 12-1. Uma vez que as soldas foram realizadas sem a utilização de gás de purga, é provável que a presença de oxigênio na raiz tenha provocado oxidação e, conseqüentemente, a perfuração do cordão em alguns pontos.

Já com relação à limpeza das chapas, o jateamento se mostrou bastante eficiente, se comparado visualmente o aspecto das chapas limpas por este método com o aspecto daquelas limpas utilizando escova de aço. Dessa forma, nas próximas séries de testes utilizou-se jateamento com areia para a limpeza das chapas, seguida apenas de uma limpeza com álcool para remover eventuais resíduos de areia e demais impurezas, dispensando assim a utilização de ácido.

### 7.3 Conclusões

Foi demonstrada a possibilidade de se soldar chapas de aço ao carbono de 1,5 mm de espessura montadas em topo utilizando o processo a plasma e com uso de cobre-junta. Não foram exploradas nestes experimentos as faixas de velocidades limites por fugir do escopo do trabalho (esforço de investigação concentrado nas juntas em aresta por serem correntemente consideradas de pior soldabilidade). Entretanto, no caso da soldagem de juntas de topo comparativamente à soldagem de juntas em aresta, a velocidade típica de soldagem é menor, sendo de um nível comparável às obtidas para juntas sobrepostas.

# Capítulo VIII

## Avaliação do Desempenho de Misturas Gasosas a Base de Argônio

### 8.1 Introdução

O objetivo neste capítulo é estudar e avaliar o desempenho de misturas gasosas a base de Argônio (mistura composta de Ar e aditivos gasosos) na soldagem a plasma "melt-in" de juntas em aresta, visando elevar os limites de velocidade de soldagem ao máximo, sem comprometer a aceitabilidade dos cordões de solda. Lembrando que devido os interesses comerciais do patrocinador deste trabalho, as misturas gasosas a base de Argônio serão apenas codificadas em função do aditivo utilizado. A codificação das misturas será feita por letras (representando o aditivo utilizado) e por um número (porcentagem deste aditivo multiplicado por 10). Por exemplo: a mistura A50 contém 5% de aditivo A, a mistura B25 possui 2,5% de aditivo B e a mistura A50C50 contém 5% de aditivo A e 5% de aditivo C.

No capítulo V deste presente trabalho foram apresentados os resultados da determinação de faixas de velocidade de soldagem que condicionaram cordões totalmente conformes pelo processo plasma em juntas em aresta, usando-se a mistura A50 comercial como gás de plasma e proteção. Esta mistura já havia mostrado proporcionar melhor desempenho do que o uso de Argônio puro. Os cordões obtidos nos limites superiores destas faixas de velocidade foram considerados como padrões de comparação para os resultados que seguem neste presente capítulo. Nas novas séries de testes foram utilizadas misturas gasosas com teores variados de aditivos gasosos, as quais foram obtidas com auxílio de um misturador. Procurou-se para cada mistura gasosa utilizada determinar uma condição de soldagem (limite superior de velocidade) que leve a cordões conformes para um dado valor de corrente média, tanto do ponto de vista da qualidade como da repetibilidade. Estas velocidades máximas foram, então, comparadas com as obtidas com a condição padrão no mesmo nível de corrente (capítulo V), verificando desta maneira se as novas misturas gasosas são ou não benéficas quanto ao aumento de produtividade do processo, isto é, se permitem ou não um aumento no limite superior de velocidade de soldagem para uma determinada corrente.

### 8.2 Soldagem dos corpos de prova e avaliação dos resultados

#### 8.2.1 Utilização do misturador e do programa "ROTO BR.xls"

Para obter as misturas gasosas foi utilizado um misturador de gás (Figura 8.1). Este misturador constitui-se de 4 rotâmetros com faixas de vazão seqüenciais e uma câmara de mistura posicionada na saída dos rotâmetros. Através do ajuste da vazão de cada gás em cada rotâmetro, se consegue a mistura final desejada na câmara de mistura. Na saída do misturador (do vazo de mistura), foi colocado um bifurcador para conduzir a mistura para as entradas de gás de proteção e de plasma da tocha.

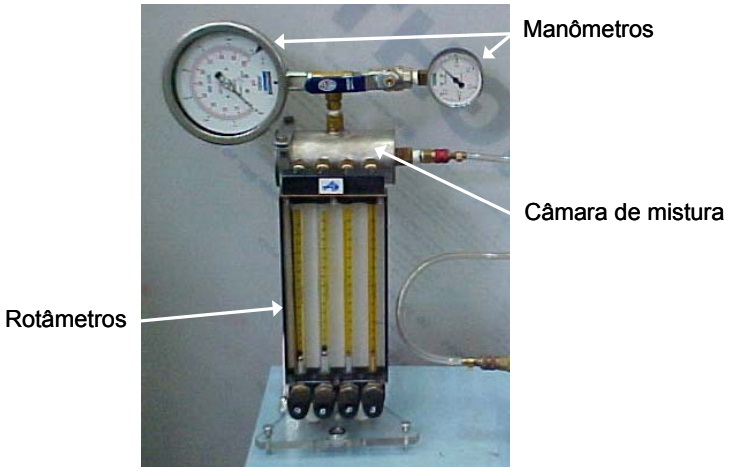



Figura 8.1: Misturador de gás

Os valores de ajuste de vazão nos rotâmetros foi feito com base na utilização de um programa denominado “ROTO BR.xls”, cuja tela de entrada de dados está mostrada na Figura 8.2.

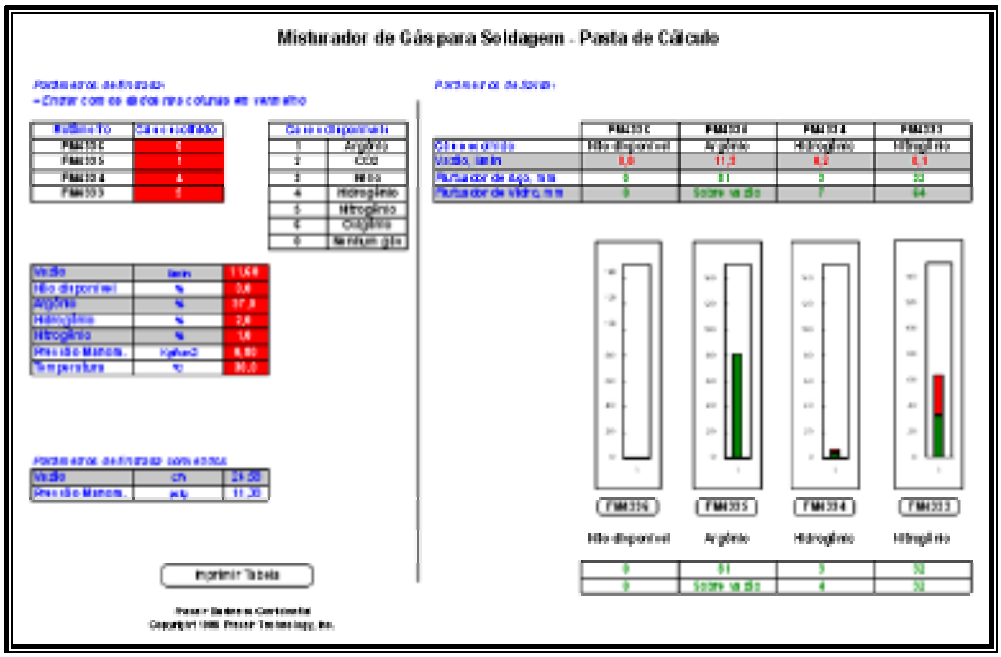



Figura 8.2: Tela de entrada de dados do programa “ROTO BR.xls”

Para se utilizar o programa “ROTO BR.xls” primeiramente escolhe-se os gases que irão compor a mistura. Logo a seguir entra-se com os números referentes a cada gás nas referências de cada rotâmetro, de acordo com a vazão esperada. Depois digita-se o valor total da vazão desejada (proteção mais plasma) em l/min, as porcentagens dos gases que irão compor a mistura, a pressão e por fim a temperatura ambiente. Com estes dados, o programa calcula automaticamente os valores das posições nas quais as esferas de cada rotâmetro utilizado devem estar, de maneira a se obter a mistura e a vazão desejada.

### 8.2.2 Verificação do efeito da mistura gasosa B50

Para verificar o efeito da mistura a base de Argônio denominada B50, considerou-se para o início da série de testes uma corrente de 140 A e uma velocidade de 1700 mm/min, por serem, de acordo com os ensaios da Série 13-1 mostrada no capítulo V, parâmetros condicionadores do cordão de melhor conformidade. Depois de verificadas a condição do cordão de solda, promoveu-se variações nos níveis de velocidade, de modo a obter cordões de solda com um nível satisfatório de aceitabilidade.

De maneira geral, apesar de não existir a ocorrência de irregularidade do cordão, os cordões foram considerados sem conformidade devido a grande quantidade de porosidade ocorrida em todos os testes, como é apresentado na Tabela 8.1 e ilustrado pela Figura 8.3.

Tabela 8.1: Resultados da série de testes 13-1 (mistura B50)

| Teste | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|
| 13-1-1 | 1700 | 180 | 0% (excesso de porosidade) |
| 13-1-2 | 1800 | 130 | 0% (excesso de porosidade) |
| 13-1-3 | 1500 | 115 | 0% (excesso de porosidade) |
| 13-1-4 | 1600 | 145 | 20% (excesso de porosidade) |
| 13-1-5 | 1900 | 130 | 15% (excesso de porosidade) |
| 13-1-6 | 1000 | 150 | 20% (excesso de porosidade) |
| 13-1-7 | 1250 | 100 | 30% (excesso de porosidade) |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura gasosa B50 a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura gasosa B50 a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1 s; Rampa de velocidade: 2,5 s; Ângulo de ataque: 105°; Corrente de soldagem: 140 A.*

Figura 8.3: Grande quantidade de poros no cordão de solda

Com base nos resultados, a mistura gasosa B50 mostrou não ser adequada para a soldagem devido ao excesso de porosidade que provoca, não permitindo, portanto, avaliar o efeito deste teor de aditivo B sobre a produtividade do processo (apesar de não causar a irregularidade do cordão).

### 8.2.3 Verificação do efeito da mistura gasosa B25

Como forma de tentar eliminar a presença de poros nos cordões, e assim possibilitar aceitabilidade, foram realizados novos testes com a mesma mistura gasosa, só que desta vez contendo um menor teor de aditivo B. Pode ser verificado de acordo com a Tabela 8.2 que, mesmo utilizando um menor teor de aditivo B na mistura gasosa, ainda ocorreram porosidades. Além disso, as irregularidades voltaram a ocorrer. Só com velocidades de soldagem mais baixas foi possível soldar com alguma aceitabilidade (teste 14-1-6), mas sem a repetibilidade esperada.

Tabela 8.2: Resultados da série de testes 14-1 (mistura B25)

| Teste | Velocidade (mm/min) | Corrente (A) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|---|
| 14-1-1 | 1700 | 140 | 140 | 0% (porosidade e irregularidades) |
| 14-1-2 | 1500 | 140 | 130 | 20% (porosidade e irregularidades) |
| 14-1-3 | 1000 | 140 | 135 | 10% (porosidade e irregularidades) |
| 14-1-4 | 1800 | 140 | 125 | 20% (porosidade e irregularidades) |
| 14-1-5 | 1000 | 140 | 140 | 15% (porosidade e irregularidades) |
| 14-1-6 | 1000 | 160 | 135 | 90% (aspecto rugoso e porosidade) |
| 14-1-7 | 1000 | 160 | 280 | 0% (porosidade e irregularidades) |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura gasosa B25 a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura gasosa B25 a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: $\approx 33°$; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1 s; Rampa de velocidade: 2,5 s; Ângulo de ataque: 105°.*

### 8.2.4 Verificação da repetibilidade da condição padrão

Para verificar se os problemas ocorridos nas duas séries de testes anteriores eram relativos ao aditivo B e não a algum parâmetro não controlável do processo, repetiu-se a condição definida pelo teste 10-3-5, aqui assumida como padrão (mistura A50 comercial, corrente de 140 A e velocidade de soldagem de 1700 mm/min). Para esta série foram utilizados inicialmente os mesmos parâmetros do teste 10-3-5, o que não levou à aceitabilidade e repetibilidade esperada. Tentou-se, então, reduzir a velocidade para obter cordões em conformidade. Ocorreram cordões conformes e com repetibilidade até a uma velocidade de

1200 mm/min. Esta velocidade passou a ser a velocidade de comparação para os testes seguintes, mesmo sabendo que seria necessário em breve voltar a estudar as razões para a falta de robustez do processo.

Estes resultados sugerem a necessidade também de se repetir os ensaios com uma mistura contendo aditivo tipo B.

Tabela 8.3: Resultados da série de testes 15-1 (repetibilidade do teste 10-3-5 do capítulo V)

| Teste | Velocidade (mm/min) | Corrente (A) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|---|
| 15-1-1 | 1700 | 140 | 280 | 0% (irregularidades) |
| 15-1-2 | 1700 | 140 | 280 | 0% (irregularidades) |
| 15-1-3 | 1600 | 140 | 140 | 0% (irregularidades) |
| 15-1-4 | 1300 | 140 | 130 | 0% (irregularidades) |
| 15-1-5 | 1000 | 140 | 280 | 90% (pequena irregularidade) |
| 15-1-6 | 900 | 140 | 140 | 100% |
| 15-1-7 | 900 | 140 | 280 | 100% |
| 15-1-8 | 1000 | 140 | 130 | 100% |
| 15-1-9 | 1200 | 140 | 130 | 100% |
| 15-1-10 | 1300 | 140 | 140 | 70% (irregularidades) |
| 15-1-11 | 1200 | 140 | 280 | 100% |
| 15-1-12 | 1200 | 140 | 280 | 100% |
| 15-1-13 | 1200 | 140 | 280 | 100% |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura A50 comercial a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 2 s; Rampa de velocidade: 2,5 s; Ângulo de ataque: 105°.*

### 8.2.5 Reavaliação do efeito da mistura gasosa B25

Após verificado o problema na repetibilidade do teste 10-3-5, deu-se continuidade aos testes utilizando a mistura gasosa B25 . Como pode ser verificado na Tabela 8.4, com o uso de menores níveis de velocidades de soldagem foi possível obter cordões em melhor conformidade. Entretanto, como mostra a Figura 8.4, a porosidade continuou presente nos cordões, e novamente não ocorreu repetibilidade nos resultados.

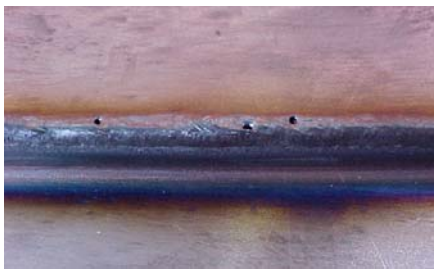
Tabela 8.4: Resultados da série de testes 16-1 (mistura B25)

| Teste | Velocidade (mm/min) | Corrente (A) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|---|
| 16-1-1 | 700 | 140 | 125 | 30% (porosidades) |
| 16-1-2 | 700 | 140 | 130 | 60% (porosidades) |
| 16-1-3 | 500 | 140 | 90 | 0% (excesso de fusão e porosidades) |
| 16-1-4 | 600 | 140 | 160 | 70% (porosidades) |
| 16-1-5 | 650 | 140 | 180 | 75% (porosidades) |

| Teste | Velocidade (mm/min) | Corrente (A) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|---|
| 16-1-6 | 800 | 140 | 260 | 50% (porosidades) |
| 16-1-7 | 700 | 140 | 260 | 90% (porosidades) |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura gasosa B25 a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura gasosa B25 a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 2 s; Rampa de velocidade: 2,5 s; Ângulo de ataque: 105°.*

Velocidade de 500 mm/min



Velocidade de 700 mm/min

Figura 8.4: Presença de poros nos cordões de solda

Com base nos resultados, notou-se que a mistura gasosa B25 não permitiu um aumento no limite superior da velocidade de soldagem para a dada corrente, mesmo assumindo-se um novo parâmetro de comparação.

### 8.2.6 Verificação do efeito da mistura A25B25

De maneira a tentar contornar os inconvenientes causados pelo uso do aditivo do tipo B, realizou-se uma série de testes utilizando uma mistura gasosa contendo também aditivo do tipo A. Os resultados para esta série de testes são apresentados na Tabela 8.5.

Tabela 8.5: Resultados da série de testes 17-1 (mistura A25B25)

| Teste | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|
| 17-1-1 | 700 | 140 | 30% (excesso de fusão) |
| 17-1-2 | 1000 | 140 | 90% (excesso de fusão) |
| 17-1-3 | 1200 | 140 | 95% (excesso de fusão) |
| 17-1-4 | 1500 | 140 | 100% |
| 17-1-5 | 1800 | 140 | 100 |
| 17-1-6 | 2000 | 140 | 100% |
| 17-1-7 | 2200 | 140 | 30% (falta de fusão e irregularidades) |
| 17-1-8 | 2100 | 140 | 40% (falta de fusão e irregularidades) |
| 17-1-9 | 2000 | 140 | 90% (falta de fusão e irregularidade) |
| 17-1-10 | 2000 | 140 | 100% |
| 17-1-11 | 2000 | 280 | 40% (falta de fusão e irregularidades) |

| Teste | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|
| 17-1-12 | 1800 | 280 | 90% (falta de fusão e irregularidades) |
| 17-1-13 | 1500 | 280 | 100% |
| 17-1-14 | 1500 | 140 | 50% (irregularidades) |
| 17-1-15 (*) | 1500 | 280 | 95% (presença de poros) |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura gasosa A25B25 a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura gasosa A25B25 a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1,5 s; Rampa de velocidade: 2,5 s; Ângulo de ataque: 105°; Corrente de soldagem: 140 A.*
*(*) teste realizado com desligamento do arco piloto durante a soldagem.*

Iniciaram-se os testes com uma velocidade de 700mm/min, por ter ocorrido, a essa velocidade de soldagem, o cordão de melhor aceitabilidade para a mistura B25. Como ocorreu excesso de fusão, mantida a corrente de soldagem em 140 A, a velocidade foi subseqüentemente elevada até 2000 mm/min, garantindo ainda a conformidade total dos cordões, não ocorrendo, entretanto, a repetibilidade esperada.

### 8.2.7 Verificação do efeito da mistura A25

Com o intuito de verificar a influência do aditivo do tipo A utilizado na mistura gasosa, foi feita uma série de testes com a mistura A25. Os resultados para esta série de testes seguem na Tabela 8.6.

Tabela 8.6: Resultados da série de testes 18-1 (mistura A25)

| Teste | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão de solda |
|---|---|---|---|
| 18-1-1 | 1000 | 280 | 100% |
| 18-1-2 | 1500 | 280 | 20% (falta de fusão e irregularidades) |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura gasosa A25 a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura gasosa A25 a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1,5 s; Rampa de velocidade: 2,5 s; Ângulo de ataque: 105°; Corrente de soldagem: 140 A.*

Utilizando-se uma velocidade de soldagem de 1000 mm/min, o resultado foi bastante satisfatório, como mostrou o teste 18-1-1. No entanto, a uma velocidade de soldagem mais elevada (1500 mm/min) não foi possível obter um cordão conforme, ocorreram irregularidades e falta de fusão. Deve-se lembrar que uma velocidade de soldagem de 1500 é acima do valor de comparação, usando a mistura A50 comercial.

Com o intuito de verificar a aceitabilidade dos cordões de solda para diferentes teores do aditivo A, deu-se início a uma nova fase de testes na qual foram adicionadas quantidades crescentes deste aditivo junto ao Argônio.

### 8.2.8 Efeito de misturas compostas por Ar e diferentes teores do aditivo A

Para a realização desta fase de testes foram utilizados 5 teores crescentes do aditivo A em combinação com Argônio e variada a velocidade de soldagem até o seu limite superior para cada mistura. Na primeira série de testes desta fase foi utilizada a mistura A10. Os resultados para esta série (19-1) são mostrados na Tabela 8.7.

Tabela 8.7: Resultados da série de testes 19-1 (mistura A10)

| Teste | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|
| 19-1-1 | 1200 | 140 | 0% (falta de fusão e irregularidades) |
| 19-1-2 | 1000 | 140 | 90% (irregularidades) |
| 19-1-3 | 1100 | 280 | 0% (falta de fusão e irregularidades) |
| 19-1-4 | 1000 | 140 | 10% (falta de fusão e irregularidades) |
| 19-1-5 | 1000 | 140 | 10% (falta de fusão e irregularidades) |
| 19-1-6 | 800 | 140 | 70% (excesso de fusão e irregularidades) |
| 19-1-7 | 700 | 140 | 60% (excesso de fusão e irregularidades) |
| 19-1-8 | 700 | 280 | 80% (excesso de fusão e irregularidades) |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura gasosa A10 a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura gasosa A10 a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1,5 s; Rampa de velocidade: 2,5 s; Ângulo de ataque: 105°; Corrente de soldagem: 140 A.*

Com relação à aceitabilidade dos cordões de solda, apesar de terem ocorrido alguns resultados satisfatórios, não foi possível obter repetibilidade devido à irregularidade proporcionada por essa mistura (Figura 8.5), comprovando que com esse teor do aditivo A a mistura se comporta de maneira bem similar ao Argônio puro.

Figura 8.5: Irregularidade ocorrida na utilização da mistura A10

Na próxima série de testes (19-2) a proporção do aditivo A foi elevada (mistura A20). Os resultados para essa série são mostrados na Tabela 8.8.

Tabela 8.8: Resultados da série de testes 19-2 (mistura A20)

| Teste | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|
| 19-2-1 | 700 | 140 | 90% (excesso de fusão) |
| 19-2-2 | 800 | 140 | 90% (excesso de fusão) |
| 19-2-3 | 900 | 280 | 100% |
| 19-2-4 | 1000 | 140 | 100% |
| 19-2-5 | 1200 | 140 | 50% (irregularidades) |
| 19-2-6 | 1100 | 140 | 0% (irregularidades) |
| 19-2-7 | 1000 | 280 | 100% |
| 19-2-8 | 1000 | 280 | 100% |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura gasosa A20 a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura gasosa A20 a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1,5 s; Rampa de velocidade: 2,5 s; Ângulo de ataque: 105°; Corrente de soldagem: 140 A.*

Com relação à aceitabilidade dos cordões, ocorreu total conformidade e repetibilidade até a uma velocidade de soldagem de 1.000 mm/min (limite superior), como mostraram os testes 19-2-4, 19-2-7 e 19-2-8 e ilustra a Figura 8.6.

Figura 8.6: Trecho de cordão totalmente conforme (mistura A20)

Na próxima série de testes (19-3) foi utilizada a mistura gasosa A30. Os resultados obtidos para esta mistura são mostrados na Tabela 8.9.

Tabela 8.9: Resultados da série de testes 19-3 (mistura A30)

| Teste | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|
| 19-3-1 | 900 | 140 | 70% (excesso de fusão e irregularidades) |
| 19-3-2 | 1000 | 140 | 100% |
| 19-3-3 | 1100 | 140 | 100% |
| 19-3-4 | 1200 | 140 | 100% |
| 19-3-5 | 1300 | 140 | 80% (irregularidades) |
| 19-3-6 | 1300 | 140 | 40% (irregularidades) |
| 19-3-7 | 1200 | 280 | 100% |
| 19-3-8 | 1200 | 280 | 100% |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura gasosa A30 a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura gasosa A30 a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1,5 s; Rampa de velocidade: 2,5 s; Ângulo de ataque: 105°; Corrente de soldagem: 140 A.*

A mistura A30 permitiu aumentar o limite superior de velocidade de soldagem para 1200 mm/min, como mostraram os testes 19-3-4, 19-3-7 e 19-3-8 e ilustra a Figura 8.7.

Figura 8.7: Trecho de cordão totalmente conforme com a mistura A30

Na próxima série de testes (19-4) foi utilizada a mistura gasosa A40. Os resultados para esta série de testes são mostrados na Tabela 8.10.

Tabela 8.10: Resultados da série de testes 19-4 (mistura A40)

| Teste | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|
| 19-4-1 | 1000 | 140 | 90% (excesso de fusão) |
| 19-4-2 | 1100 | 140 | 100% |
| 19-4-3 | 1200 | 140 | 100% |
| 19-4-4 | 1300 | 140 | 100% |
| 19-4-5 | 1400 | 140 | 100% |
| 19-4-6 | 1500 | 140 | 40% (irregularidades) |
| 19-4-7 | 1400 | 140 | 100% |
| 19-4-8 | 1400 | 280 | 100% |
| 19-4-9 | 1400 | 280 | 100% |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura gasosa A40 a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura gasosa A40 a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1,5 s; Rampa de velocidade: 2,5 s; Ângulo de ataque: 105°; Corrente de soldagem: 140 A.*

Com a utilização da mistura A40 foi possível obter cordões de total conformidade a uma velocidade de soldagem de até 1400 mm/min, como mostraram os testes 19-4-5, 19-4-7, 19-4-8 e 19-4-9 e ilustra a Figura 8.8.

Figura 8.8: Trecho de cordão totalmente conforme com a mistura A40

Na próxima série de testes (19-5) verificou-se o efeito da mistura gasosa A50. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 8.11.

Tabela 8.11: Resultados da série de testes 19-5 (mistura A50)

| Teste | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|
| 19-5-1 | 1200 | 140 | 90% (excesso de fusão) |
| 19-5-2 | 1300 | 140 | 90% (excesso de fusão) |
| 19-5-3 | 1400 | 140 | 100% |
| 19-5-4 | 1500 | 140 | 100% |
| 19-5-5 | 1600 | 140 | 90% (falta de fusão) |
| 19-5-6 | 1600 | 140 | 100% |
| 19-5-7 | 1700 | 140 | 100% |
| 19-5-8 | 1800 | 140 | 100% |
| 19-5-9 | 1900 | 140 | 100% |
| 19-5-10 | 2000 | 140 | 70% (falta de fusão) |
| 19-5-11 | 1900 | 140 | 70% (falta de fusão) |
| 19-5-12 | 1800 | 140 | 90% (falta de fusão) |
| 19-5-13 | 1700 | 140 | 100% |
| 19-5-14 | 1700 | 140 | 100% |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura gasosa A50 a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura gasosa A50 a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1,5 s; Rampa de velocidade: 2,5 s; Ângulo de ataque: 105°; Corrente de soldagem: 140 A.*

Utilizando a mistura A50 (mesma composição da mistura A50 comercial) foi possível imprimir velocidades de soldagem de até 1700 mm/min (limite superior) sem, no entanto, comprometer a aceitabilidade dos cordões como mostraram os testes 19-5-7, 19-5-13 e 19-5-14 e ilustra a Figura 8.9.

Figura 8.9: Trecho de cordão totalmente conforme (velocidade de 1700 mm/min)

A partir dessa fase de testes verificou-se realmente que ao aumentar o teor do aditivo A junto ao Argônio para a formação da mistura gasosa foi possível obter cordões com ótima aceitabilidade mesmo a velocidades de soldagem mais elevadas, como 1700 mm/min, por exemplo.

A Figura 8.10 ilustra a evolução do limite superior da velocidade de soldagem em função do teor de aditivo A adicionado junto ao Argônio. Com o aumento do teor do aditivo do tipo A foi possível aumentar o limite superior da velocidade de forma razoável, chegando, com a mistura A50, a um limite superior de velocidade de 1700 mm/min.

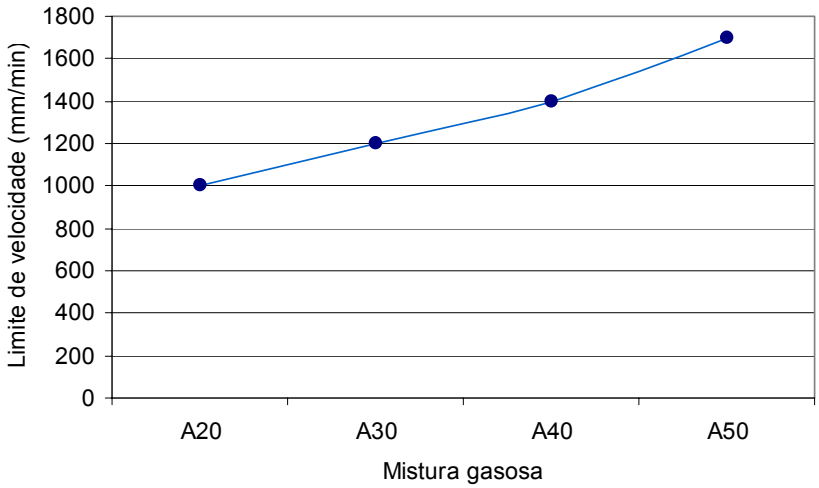



Figura 8.10: Evolução do limite superior de velocidade com o teor de aditivo A

Deve-se chamar atenção para o fato de que, com a mistura A50 foi possível alcançar resultado semelhante ao obtido com a mistura A50 comercial relatado no capítulo V, mas superior ao resultado obtido com esta mesma mistura (A50 comercial) em testes mais recentes (item 8.2.4 do presente capítulo). Isto leva a crer poder existir uma mistura ineficiente do aditivo A com o Argônio dentro do misturador, ou também algum fenômeno de separação deste aditivo do Argônio no caminho (mangueiras) até a tocha de soldagem.

### 8.2.9 Reavaliação do efeito da mistura A50 comercial

Com o intuito de verificar se realmente a mistura A50, feita através do misturador e utilizada na série de testes 19-5, estava correta, foi realizada uma nova série de testes (20-1) utilizando a mistura A50 comercial. Utilizando os mesmos parâmetros da série 19-5, a velocidade de soldagem foi gradativamente elevada até seu limite superior, acima do qual não foi possível mais soldar com boa conformidade. A Tabela 8.12 mostra os resultados obtidos para a série 20-1 de testes.

Tabela 8.12: Resultados da série de testes 20-1 (mistura A50 comercial)

| Teste | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|
| 20-1-1 | 1300 | 140 | 100% |
| 20-1-2 | 1400 | 140 | 100% |
| 20-1-3 | 1500 | 140 | 80% (falta de fusão) |
| 20-1-4 | 1500 | 140 | 90% (falta de fusão) |
| 20-1-5 | 1600 | 140 | 80% (falta de fusão e irregularidades) |
| 20-1-6 | 1600 | 140 | 90% (falta de fusão e irregularidades) |
| 20-1-7 | 1600 | 280 | 30% (falta de fusão e irregularidades) |
| 20-1-8 | 1500 | 280 | 85% (falta de fusão e irregularidades) |
| 20-1-9 | 1500 | 280 | 95% (irregularidades) |
| 20-1-10 | 1400 | 280 | 100% |
| 20-1-11 | 1900 | 140 | 100% |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura A50 comercial a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1,5 s; Rampa de velocidade: 2,5 s; Ângulo de ataque: 105°; Corrente de soldagem: 140 A.*

Verificou-se que não foi possível aumentar efetivamente o limite superior de velocidade para a mistura A50 comercial. Como verificado em testes anteriores (item 8.2.4), o limite se encontra entre 1300 a 1400 mm/min. Esse limite sugere que a mistura A50 realizada pelo misturador provavelmente não está correta, uma vez que possibilitou um alcance de 1700 mm/min de velocidade de soldagem, sem comprometer de forma alguma a aceitabilidade dos cordões, ou pelo menos não está na mesma condição de solução do que a apresentada pelo cilindro de gás comercial. O limite de velocidade mais elevado obtido possivelmente ocorreu por uma quantidade de aditivo A presente na mistura maior do que a especificada.

Até o momento duas suspeitas sobre o desempenho do misturador se sustentam. A primeira é de que o percentual da mistura não representa a percentagem real. A segunda é de que a mistura está correta em termos nominais, mas não está havendo uma mistura verdadeira entre os componentes. No caso da mistura comercial, já envazada em cilindros, pode estar havendo uma separação dos componentes, o que seria a causa da não repetibilidade entre as séries relatadas no capítulo V e no atual capítulo (o cilindro foi trocado).

### 8.2.10 Efeito das misturas compostas por Ar e teores crescentes de A e B

Nesta fase de testes foram adicionadas ao Argônio quantidades crescentes dos aditivos A e B ao mesmo tempo, para verificar a influência destas adições na capacidade de velocidade de soldagem proporcionada pela mistura. Para a primeira série de testes (21-1) foi utilizada a mistura composta A10B10. A Tabela 8.13 mostra os resultados para esta série de testes.

Tabela 8.13: Resultados da série de testes 21-1 (mistura A10B10)

| Teste | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|
| 21-1-1 | 700 | 280 | 90% (excesso de fusão) |
| 21-1-2 | 900 | 280 | 100% |
| 21-1-3 | 1100 | 280 | 0% (irregularidades) |
| 21-1-4 | 1000 | 280 | 80% (irregularidades) |
| 21-1-5 | 900 | 280 | 70% (irregularidades) |
| 21-1-6 | 800 | 280 | 95% (excesso de fusão) |
| 21-1-7 | 800 | 280 | 70% (excesso de fusão e irregularidades) |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura gasosa A10B10 a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura gasosa A10B10 a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1,5 s; Rampa de velocidade: 2,5 s; Ângulo de ataque: 105°; Corrente de soldagem: 140 A.*

Com relação à aceitabilidade dos cordões de solda, apesar de terem ocorrido alguns resultados satisfatórios a baixas velocidades, não foi possível obter repetibilidade devido à irregularidade proporcionada por essa mistura, pois com esses teores de A e B a mistura se comportou de maneira similar ao Argônio puro. Entretanto, notou-se uma melhora no aspecto visual dos cordões quando comparados aos obtidos com a mistura A10 utilizada na série de testes 19-1.

Na próxima série de testes (21-2) foi utilizada a mistura A20B10. A Tabela 8.14 mostra os resultados desta série de testes.

Tabela 8.14: Resultados da série de testes 21-2 (mistura A20B10)

| Teste | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|
| 21-2-1 | 900 | 140 | 100% |
| 21-2-2 | 1000 | 140 | 100% |
| 21-2-3 | 1100 | 280 | 80% (irregularidades) |
| 21-2-4 | 1000 | 280 | 95% (irregularidades) |
| 21-2-5 | 900 | 280 | 100% |
| 21-2-6 | 900 | 280 | 100% |
| 21-2-7 | 900 | 280 | 100% |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura gasosa A20B10 a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura gasosa A20B10 a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1,5 s; Rampa de velocidade: 2,5 s; Ângulo de ataque: 105°; Corrente de soldagem: 140 A.*

Com o aumento do teor do aditivo A foi possível obter uma estabilidade no processo de soldagem. Essa estabilidade permitiu soldar com total aceitabilidade e repetibilidade até uma velocidade de 900 mm/min, como pode ser verificado nos testes 21-2-5, 21-2-6 e 21-2-7.

Para a próxima série de testes (21-3) foi utilizada a mistura A20B20. A Tabela 8.15 mostra os resultados desta série de testes.

Tabela 8.15: Resultados da série de testes 21-3 (mistura A20B20)

| Teste | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|
| 21-3-1 | 800 | 280 | 90% (excesso de fusão) |
| 21-3-2 | 1000 | 280 | 95% (excesso de fusão) |
| 21-3-3 | 1200 | 280 | 70% (irregularidades) |
| 21-3-4 | 1100 | 280 | 100% |
| 21-3-5 | 1100 | 280 | 100% |
| 21-3-6 | 1100 | 280 | 100% |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura gasosa A20B20 a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura gasosa A20B20 a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1,5 s; Rampa de velocidade: 2,5 s; Ângulo de ataque: 105°; Corrente de soldagem: 140 A.*

Utilizando a mistura A20B20 foi possível obter cordões totalmente conformes até uma velocidade de soldagem de 1100 mm/min (testes 21-3-4, 21-3-5 e 21-3-6), ou seja, um ganho de 200 mm/min em relação à mistura A20B10 utilizada na série de testes 21-2.

Para a próxima série de testes (série 21-4) foi utilizada a mistura A30B30. Os resultados desta série de testes são mostrados na Tabela 8.16.

Tabela 8.16: Resultados da série de testes 21-4 (mistura A30B30)

| Teste | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|
| 21-4-1 | 1000 | 280 | 90% (pequenos poros) |
| 21-4-2 | 1100 | 280 | 98% (pequenos poros) |
| 21-4-3 | 1200 | 280 | 98% (pequenos poros) |
| 21-4-4 | 1300 | 280 | 98% (pequenos poros) |
| 21-4-5 | 1400 | 280 | 98% (pequenos poros) |
| 21-4-6 | 1500 | 280 | 40% (irregularidades) |
| 21-4-7 | 1400 | 280 | 98% (pequenos poros) |
| 21-4-8 | 1400 | 280 | 98% (pequenos poros) |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura gasosa A30B30 a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura gasosa A30B30 a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1,5 s; Rampa de velocidade: 2,5 s; Ângulo de ataque: 105°; Corrente de soldagem: 140 A.*

Com relação à aceitabilidade dos cordões de solda, apesar de terem ocorrido resultados satisfatórios e repetibilidade com uma velocidade de soldagem de 1400 mm/min, não foi possível obter total conformidade devido à presença de pequenos poros distribuídos ao longo do cordão, como mostra a Figura 8.11. Vale ressaltar que a medida que a velocidade de soldagem foi elevada, a quantidade de poros no cordão diminuiu (provavelmente, a porosidade foi provocada por um elevado teor do aditivo B na mistura gasosa).

Figura 8.11: Cordão com pequenos poros provocados pelo elevado teor do aditivo B (mistura A30B30)

Como forma de tentar eliminar a porosidade e aumentar o limite superior da velocidade de soldagem, uma nova série de testes (21-5) foi realizada. Nesta nova série de testes foi utilizada a mistura A40B30. Os resultados para esta série de testes são mostrados na Tabela 8.17.

Tabela 8.17: Resultados da série de testes 20-5 (mistura A40B30)

| Teste | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|
| 21-5-1 | 1000 | 280 | 100% |
| 21-5-2 | 1100 | 280 | 100% |
| 21-5-3 | 1200 | 280 | 100% |
| 21-5-4 | 1200 | 280 | 100% (pequenos poros) |
| 21-5-5 | 1300 | 280 | 100% (pequenos poros) |
| 21-5-6 | 1400 | 280 | 100% (pequenos poros) |
| 21-5-7 | 1500 | 280 | 100% (pequenos poros) |
| 21-5-8 | 1600 | 280 | 100% (pequenos poros e irregularidades) |
| 21-5-9 | 1500 | 280 | 100% (pequenos poros) |
| 21-5-10 | 1500 | 280 | 100% (pequenos poros) |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura gasosa A40B30 a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura gasosa A40B30 a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1,5 s; Rampa de velocidade: 2,5 s; Ângulo de ataque: 105°; Corrente de soldagem: 140 A.*

O uso da mistura A40B30 possibilitou obter cordões totalmente conformes até uma velocidade de soldagem de 1500 mm/min (testes 21-5-7, 21-5-9 e 21-5-10), ou seja, um ganho de 100 mm/min em relação à mistura A30B30 utilizada na série de testes 21-4. Entretanto, verificou-se novamente, desta vez em menor quantidade, a ocorrência de pequenos poros ao longo dos cordões como os mostrados na Figura 8.11.

Pode-se dizer, a partir destes resultados, que aparentemente o aditivo B pouco contribui para o aumento do limite de velocidade (por exemplo: a mistura A40 demonstra o mesmo efeito que a mistura A30B30 e um pouco menor, 100 mm/min a menos, que a mistura A40B30). Considerando a geração de porosidade ocorrida, além de outros malefícios metalúrgicos esperados para a soldagem de aço ao carbono, o uso do aditivo B será descartado.

## 8.3 Conclusões

- A utilização do aditivo B em misturas com Argônio não se mostrou eficiente para melhorar o processo a plasma “melt-in” na soldagem de aço ao carbono em juntas em aresta, devido a geração de poros;
- Já a utilização do aditivo A em misturas com Argônio mostrou-se bastante eficiente para melhorar o processo de soldagem;
- A utilização conjunta do aditivo B com misturas formadas por Argônio e pelo aditivo A mostrou pouco melhorar o desempenho destas misturas, além de degradar outras características (formação de poros);

# Capítulo IX

## Influência da Proteção Gasosa Adicional, da Corrente Pulsada e do Equipamento

### 9.1 Introdução

No capítulo V foi demonstrada a viabilidade da soldagem a plasma de aço ao carbono, confirmados os limites operacionais e definida uma condição padrão para juntas em aresta, servindo de comparação para possíveis melhoramentos. Entretanto, é necessário ainda procurar formas de aumentar a robustez do processo e, se possível, aumentar ainda mais a produtividade (pelo aumento da velocidade de soldagem para uma dada corrente). Como forma de atingir tais objetivos, neste presente capítulo é apresentada uma avaliação da influência de uma proteção gasosa adicional na parte posterior da poça de fusão sobre a velocidade máxima de soldagem. Além disso, são apresentadas avaliações quanto ao uso de corrente pulsada e com relação à utilização de outro equipamento comercial de soldagem.

### 9.2 Soldagem dos corpos de prova e avaliação dos resultados

#### 9.2.1 Influência da proteção gasosa na parte posterior da poça de fusão

De forma a possibilitar uma proteção na parte posterior da poça de fusão, e assim tentar elevar o limite superior de velocidade de soldagem, foi utilizado um fluxo adicional de gás nesta região. Para concentrar esse fluxo de gás na região posterior da poça, foi projetado um direcionador de gás para ser adaptado à tocha de soldagem. A Figura 9.1 mostra maiores detalhes construtivos deste direcionador, enquanto a Figura 9.2 mostra a tocha sem e com este dispositivo.

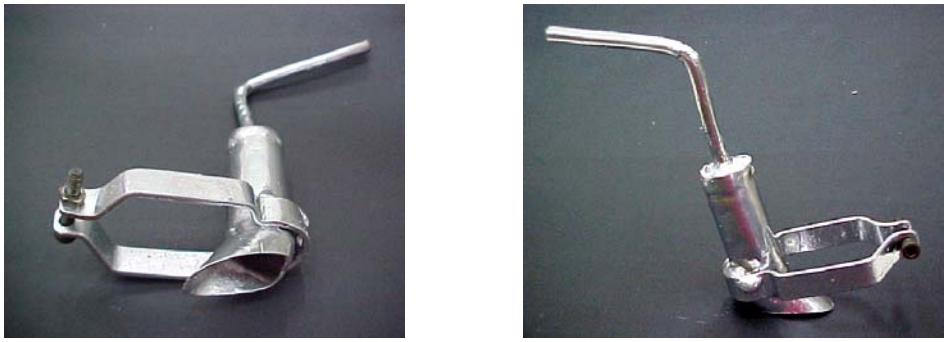
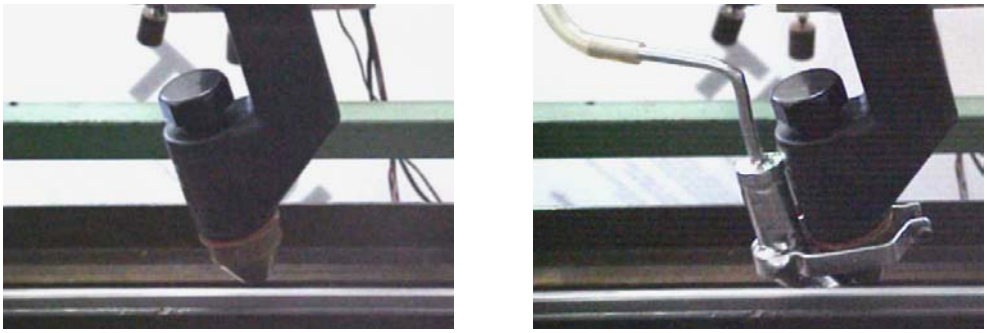


Figura 9.1: Detalhes do direcionador de gás



Sem direcionador Com direcionador

Figura 9.2: Tocha de soldagem sem e com o direcionador de gás

Uma vez desenvolvido o direcionador de gás de proteção auxiliar, realizou-se a série de testes 22-1, cujos resultados são mostrados na Tabela 9.1. Como gás de proteção adicional, foi utilizada a mesma mistura (A50 comercial) usada no sistema de proteção convencional da tocha e como gás de plasma, a uma vazão de 3 l/min (ao contrário da vazão do gás de plasma e de proteção, esta vazão adicional não foi calibrada). Destaca-se que o teste 22-1-7 foi realizado sem a proteção gasosa adicional para fins de comparação.

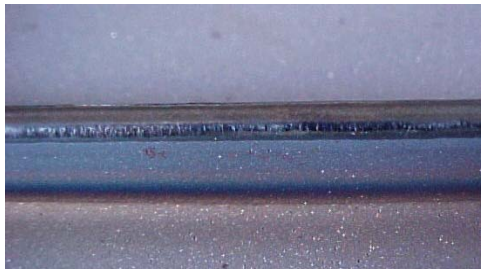
Tabela 9.1: Resultados da série de testes 22-1 (proteção adicional com Mistura A50 comercial a 3 l/min)

| Teste | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|
| 22-1-1 | 1000 | 270 | 100% |
| 22-1-2 | 1200 | 280 | 100% |
| 22-1-3 | 1300 | 280 | 100% |
| 22-1-4 | 1400 | 280 | 85% (irregularidades) |
| 22-1-5 | 1300 | 280 | 100% |
| 22-1-6 | 1300 | 280 | 100% |
| 22-1-7 * | 1300 | 280 | 100% |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás adicional de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 3 l/min; Gás de Plasma: mistura A50 comercial a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1,5 s; Rampa de velocidade: 2,5 s; Ângulo de ataque: 105°; Corrente de soldagem: 140 A.*
** Teste feito sem a proteção gasosa adicional.*

Os testes realizados mostraram que a utilização de um gás de proteção adicional não foi efetiva para aumentar o limite superior da velocidade de soldagem. No entanto, essa proteção adicional favoreceu a formação de cordões de solda mais limpos, como ilustra a Figura 9.3.

Sem proteção adicional



Com proteção adicional

Figura 9.3: Trechos de cordão de solda sem e com proteção adicional

### 9.2.2 Influência da utilização da corrente pulsada

Nesta fase estudou-se o efeito do uso de corrente pulsada, comparando a eficiência desse recurso com a da utilização de corrente contínua em juntas em aresta. Para início dos testes foi realizada a série de testes 23-1. Nesta série, a velocidade de soldagem foi fixada em 1300 mm/min e os parâmetros de pulso (corrente de pulso (Ip), tempo de pulso (tp), corrente de base (Ib) e tempo de base (tb)) foram definidos de forma a resultar em uma corrente média de soldagem de 140 A (lembrando que os melhores resultados com corrente contínua foram obtidos com velocidade de 1300 mm/min e corrente de 140 A). Os resultados para esta série de testes são mostrados na Tabela 9.2.

Tabela 9.2: Resultados da série de testes 23-1 (corrente pulsada)

| Teste | Ip (A) | Ib (A) | tp (s) | tb (s) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 23-1-1 | 200 | 80 | 0,5 | 0,5 | 280 | 30% (irregularidades e falta de fusão) |
| 23-1-2 | 200 | 80 | 0,2 | 0,2 | 280 | 40% (irregularidades e falta de fusão) |
| 23-1-3 | 170 | 110 | 0,2 | 0,2 | 280 | 80% (irregularidades e falta de fusão) |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura A50 comercial a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1,5 s; Rampa de velocidade: 2,5 s; Ângulo de ataque: 105°; Corrente média de soldagem: 140 A, velocidade de soldagem: 1300 mm/min.*

De uma forma geral, houve uma tendência de descontinuidade do cordão, como se no pulso de corrente houvesse excesso de fusão e na de base falta de fusão. Nem o aumento da freqüência (teste 23-1-2), nem o aumento da freqüência aliado à redução da corrente de pulso (teste 23-2-3), provocaram efeitos significativos.

Considerando o fato de que uma continuidade nesta fase de testes (testes por tentativas) não forneceria conclusões significativas, decidiu-se realizar um planejamento experimental. A intenção é analisar de maneira mais relevante a influência dos diversos parâmetros de pulso no processo de soldagem a plasma de aço ao carbono neste tipo de junta.

### 9.2.3 Estudo dos efeitos da corrente pulsada

Através de um planejamento experimental $L_{16}$, apresentado na Tabela 9.3 (16 experimentos), foi proposto estudar o efeito das seguintes variáveis e respectivos níveis:

- Corrente de pulso (Ip) = 140, 160, 180 e 200 A;
- Tempo de pulso (tp) = 0,2, 0,4 e 0,6 s;
- Tempo de base (tb) = 0,2, 0,4 e 0,6 s;
- Corrente média de soldagem (Im) = 120, 130 e 140 A;
- Velocidade de soldagem = 1100, 1200, 1300 e 1400 mm/min.

De maneira a obter resultados mais substanciais, para cada experimento definido no planejamento experimental, foram replicados todos os testes (sub-série A e sub-série B). O critério para definir o percentual de cordão com aceitabilidade foi um pouco modificado, passando a serem considerados todos comprimentos em que os cordões apresentassem aspecto de boa aceitabilidade. Para cada teste realizado os trechos de boa aceitabilidade foram medidos, obtendo-se assim o percentual de aceitabilidade (somatória dos comprimentos de boa aceitabilidade em relação ao comprimento total do cordão de solda). Os experimentos do planejamento experimental e os respectivos resultados obtidos (série de testes 24-1) são mostrados na Tabela 9.3.

Tabela 9.3: Resultados da série de testes 24-1 (corrente pulsada)

| Teste | Ip (A) | Ib (A) | tp (s) | Tb (s) | Im (A) | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | % do cordão com boa aceitabilidade | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | Sub-série A | Sub-série B | Média |
| 24-1-1* | 180 | -20 | 0.6 | 0.2 | 130 | 1400 | 280 | - | - | - |
| 24-1-2 | 200 | 67 | 0.4 | 0.6 | 120 | 1400 | 280 | 10 | 58 | 34 |
| 24-1-3 | 140 | 100 | 0.2 | 0.2 | 120 | 1100 | 280 | 68 | 74 | 71 |
| 24-1-4 | 200 | 60 | 0.2 | 0.2 | 130 | 1300 | 280 | 12 | 78 | 45 |
| 24-1-5 | 160 | 120 | 0.2 | 0.6 | 130 | 1100 | 280 | 95 | 100 | 97 |
| 24-1-6 | 180 | 60 | 0.4 | 0.2 | 140 | 1100 | 280 | 75 | 95 | 85 |
| 24-1-7* | 160 | 0 | 0.6 | 0.2 | 120 | 1200 | 280 | - | - | - |
| 24-1-8 | 140 | 120 | 0.4 | 0.4 | 130 | 1200 | 280 | 11 | 10 | 10 |
| 24-1-9 | 180 | 127 | 0.2 | 0.6 | 140 | 1200 | 280 | 56 | 100 | 78 |
| 24-1-10 | 200 | 80 | 0.2 | 0.2 | 140 | 1200 | 280 | 14 | 26 | 20 |
| 24-1-11 | 180 | 90 | 0.2 | 0.4 | 120 | 1300 | 280 | 19 | 14 | 16 |
| 24-1-12 | 200 | 50 | 0.6 | 0.4 | 140 | 1100 | 280 | 69 | 12 | 40 |
| 24-1-13 | 140 | 140 | 0.6 | 0.6 | 140 | 1300 | 280 | 71 | 100 | 85 |
| 24-1-14 | 160 | 100 | 0.4 | 0.2 | 140 | 1300 | 280 | 82 | 100 | 91 |
| 24-1-15 | 160 | 130 | 0.2 | 0.4 | 140 | 1400 | 280 | 65 | 56 | 60 |

| Teste | Ip (A) | Ib (A) | tp (s) | Tb (s) | Im (A) | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | % do cordão com boa aceitabilidade | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | Sub-série A | Sub-série B | Média |
| 24-1-16 | 140 | 140 | 0.2 | 0.2 | 140 | 1400 | 280 | 75 | 62 | 68 |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura A50 comercial a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1,5 s; Rampa de velocidade: 2,5 s; Ângulo de ataque: 105°.*
** Os testes 24-1-1 e 24-1-7 não foram realizados pela inconveniência da combinação de parâmetros definidos pelo planejamento experimental. Por outro lado, o experimento 24-1-13 representa a condição padrão, já que a corrente no pulso é igual à corrente na base, que é igual a corrente média.*

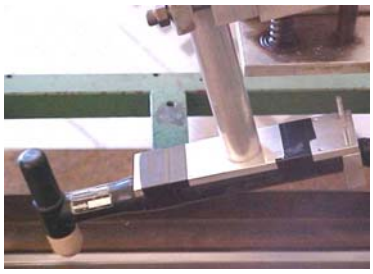
Por este planejamento experimental, esperava-se ser possível verificar a significância de cada parâmetro sobre a qualidade da solda. Pode-se observar que na sub-série A nenhum teste, inclusive a condição padrão, obteve os 100% de conformidade. Uma melhora sensível dos resultados foi observada na sub-série B, quando alguns experimentos igualaram-se em qualidade com a condição padrão, demonstrando que pode ter havido algum problema durante a realização da sub-série A. O procedimento correto seria fazer uma treplicagem (sub-série C), mas mesmo os melhores resultados da sub-série B (testes 24-1-5, 24-1-9 e 24-1-14) demonstraram não superar a velocidade limite ou aumentar a robustez da condição padrão, fazendo com que fosse abandona a idéia do uso da corrente pulsada (mais complicada operacionalmente).

### 9.2.4 Influência de outro equipamento comercial de soldagem

Neste item foi estudada a influência da fonte e do tipo de tocha nos resultados até agora obtidos. No caso, avaliou-se o uso da fonte para soldagem a plasma “Ultima 150” da Thermal Arc com a tocha PWH-3A da Thermadyne, ambos equipamentos cedidos temporariamente pelo fabricante. A fonte de soldagem, o módulo auxiliar, o módulo de controle e a tocha utilizada são mostrados na Figura 9.4.

Fonte de soldagem (abaixo) e módulo auxiliar (acima)

Módulo de controle



Tocha em um dispositivo de fixação para adaptação à mesa de soldagem

Figura 9.4: Novos equipamentos de soldagem utilizados em testes comparativos

Na primeira série de testes (série 25-1) tentou-se encontrar o limite superior para a velocidade de soldagem partindo de uma corrente de 80 A, já que a tocha PWH-3A tem um limite nominal de corrente menor do que o limite da tocha que vinha sendo utilizada (até 300 A). Os resultados para esta série de testes são mostrados na Tabela 9.4.

Tabela 9.4: Resultados da série de testes 25-1 (outro equipamento comercial de soldagem)

| Teste | Velocidade (mm/min) | Rampa de velocidade (s) | Retardo (s) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|---|---|
| 25-1-1 | 700 | 2,5 | 1,5 | 280 | 80% (irregularidades no início) |
| 25-1-2 | 650 | 5,0 | 0,5 | 280 | 95% (irregularidades no início) |
| 25-1-3 | 700 | 5,0 | 0,2 | 280 | 60% (irregularidades distribuídas) |
| 25-1-4 | 600 | 5,0 | 0,2 | 280 | 80% (irregularidades no início) |
| 25-1-5 | 600 | 0,2 | 0,2 | 280 | 90% (irregularidades no início) |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 8 l/min; Gás de Plasma: mistura A50 comercial a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 2,4 mm; Afastamento do eletrodo: gauge mínimo; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 20º; Distância da tocha à peça: 3 mm; Ângulo de ataque: 105º; Corrente de soldagem 80 A.*

Como pode ser verificado na Tabela 9.4, em geral os resultados foram bons (ver Figura 9.5), com o limite superior de velocidade estando por volta de 650 mm/min para a corrente de soldagem utilizada. Seria necessário apenas ajustar melhor os parâmetros de início da soldagem (retardo, rampa de velocidade, rampa de corrente, etc).

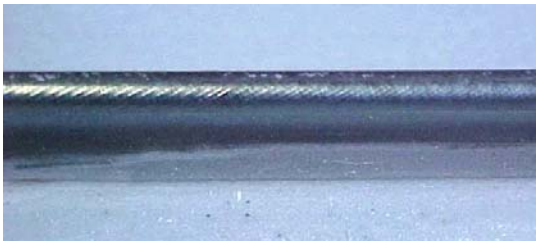


Figura 9.5: Aspecto do cordão obtido com a fonte de soldagem “Ultima 150” (teste 25-1-2)

De maneira a tentar aumentar o limite superior da velocidade de soldagem, a próxima série de testes (série 25-2) foi realizada utilizando uma corrente de soldagem de 100 A. Os resultados para esta série são mostrados na Tabela 9.5.

Tabela 9.5: Resultados da série de testes 25-2 (outro equipamento comercial de soldagem)

| Teste | Velocidade (mm/min) | Rampa de velocidade (s) | Retardo (s) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|---|---|
| 25-2-1 | 800 | 5,0 | 5,0 | 260 | 0% (irregularidades e falta de fusão) |
| 25-2-2 | 700 | 10,0 | 30,0 | 280 | 60% (irregularidades distribuídas) |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 8 l/min; Gás de Plasma: mistura A50 comercial a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 2,4 mm; Afastamento do eletrodo: gauge mínimo; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 20º; Distância da tocha à peça: 3 mm; Ângulo de ataque: 105º; Corrente de soldagem: 100 A.*

Como pode ser observado, os resultados não foram satisfatórios. Além disso, a utilização de uma corrente de soldagem de 100 A queimou (fundiu) o bocal de constrição em ambos os testes.

No entanto, comparando o valor do limite de velocidade de 650 mm/min, conseguido com a corrente de 80 A, com uma extrapolação da faixa de operação encontrada utilizando o equipamento de soldagem da IMC e da THERMAL DYNAMICS, demonstradas na Figura 9.6 (extraída do capítulo V), pode-se afirmar que haveria repetibilidade. Os mesmos resultados poderiam ser alcançados com a troca da tocha PWH-3A por uma tocha de maior limite nominal de corrente.

Entretanto, a idéia de se utilizar a fonte "Ultima 150" com a tocha PWM-300 da THERMAL DYNAMICS CORPORATION (a tocha usada até então com o equipamento da IMC) nas condições padrões, e conseqüentemente tentar separar a influência da fonte da ascendência da tocha, foi abandonada, pois o fabricante desta fonte solicitou sua devolução.

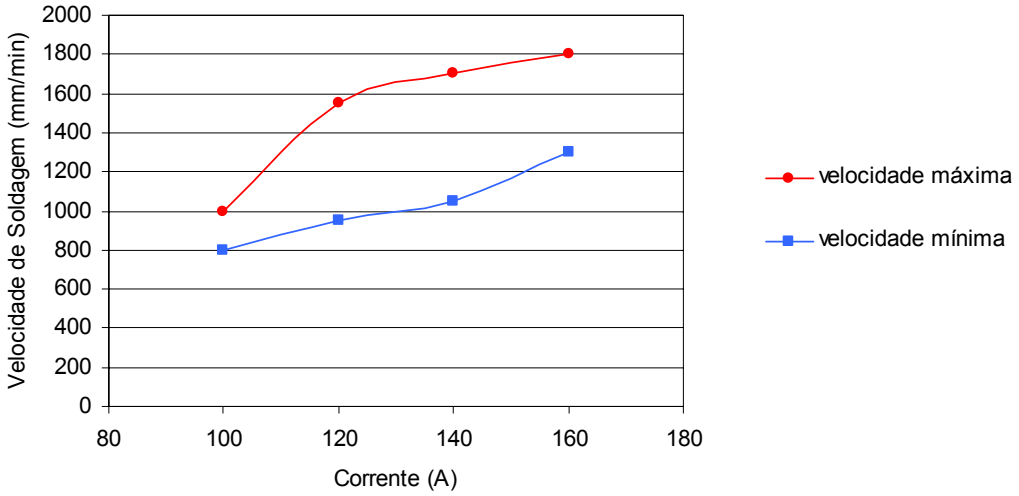



Figura 9.6: Faixa operacional de velocidades com equipamento IMC e THERMAL DYNAMICS

## 9.3 Conclusões

A partir das séries de testes realizadas neste capítulo, chegou-se às seguintes conclusões:

- A utilização de um gás de proteção adicional, apesar de favorecer a formação de cordões de solda mais limpos, não aumenta o limite de velocidade de soldagem (velocidade máxima para uma dada corrente) e nem a robustez (envelope operacional);
- O emprego da pulsação da corrente não foi efetivo para aumentar o limite de velocidade de soldagem (velocidade máxima para uma dada corrente) e nem a robustez (envelope operacional);

- O uso de outro equipamento comercial, apesar da impossibilidade de se conseguir trabalhar com correntes médias acima de 80 A, mostrou ser capaz de repetir as condições de soldagem, mostrando independência dos parâmetros de soldagem em relação ao equipamento utilizado.

# Capítulo X

## Modificações no Misturador

### 10.1 Introdução

Como mencionado anteriormente (capítulo VIII), o misturador de gás provavelmente não estava realizando a mistura especificada de forma homogênia, ou seja, os gases constituintes da mistura poderiam não estar totalmente diluídos um no outro, o que poderia estar mascarando os resultados obtidos até então com misturas realizadas neste misturador.

Como forma de contornar este problema, foi proposta a utilização de um novo conjunto misturador por meio da construção de uma segunda câmara de mistura, de geometria e características tais, que pudesse favorecer a homogeneização dos gases componentes da mistura especificada. Dessa forma, neste presente capítulo relata-se as modificações que foram feitas no misturador com o intuito de melhorar a homogeneização das misturas gasosas, bem como os resultados desta investida.

### 10.2 Soldagem dos corpos de prova e avaliação dos resultados

#### 10.2.1 Modificações no misturador de gás

A nova câmara de mistura foi construída na forma de um cilindro. Internamente a esta câmara foram colocadas 4 “chicanas” (paredes defletoras), induzindo a homogeneização da mistura de gases através da turbulência provocada pelo choque do fluxo gasoso com as “chicanas”, lembrando que este fluxo foi previamente misturado pela câmara de mistura primária já existente no misturador. A Figura 10.1 mostra a segunda câmara de mistura com detalhes internos e a Figura 10.2 o novo conjunto misturador montado.

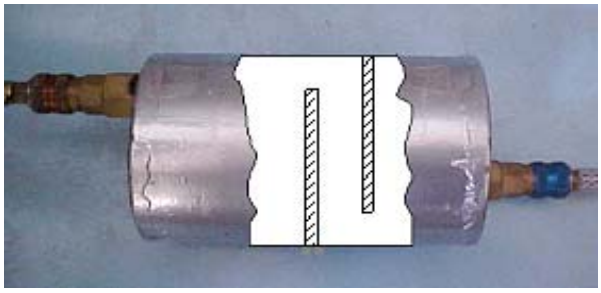


Figura 10.1: Segunda câmara de mistura com esquema dos detalhes internos

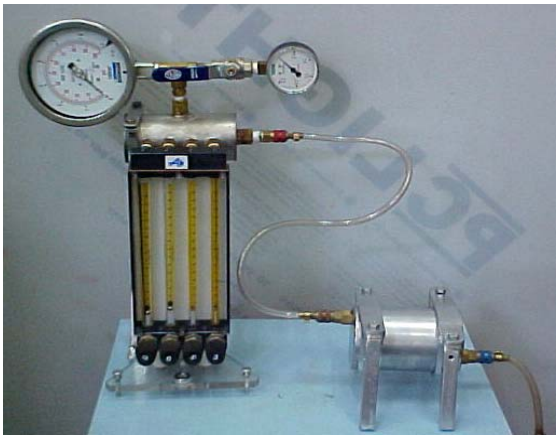


Figura 10.2: Nova versão do conjunto misturador

Como forma de se verificar o efeito das alterações realizadas no conjunto misturador sobre a aceitabilidade dos cordões de solda, realizou-se a série de testes 26-1. Os resultados para esta série de testes são mostrados na Tabela 10.1.

Tabela 10.1: Resultados da série de testes 26-1 (mistura A50)

| Teste | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|
| 26-1-1 | 1000 | 280 | 100% |
| 26-1-2 | 1100 | 280 | 100% |
| 26-1-3 | 1200 | 280 | 100% |
| 26-1-4 | 1400 | 280 | 100% |
| 26-1-5 | 1500 | 280 | 95% (falta de fusão) |
| 26-1-6 | 1600 | 280 | 30% (irregularidades e falta de fusão) |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura gasosa A50 a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura gasosa A50 a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1,5 s; Rampa de velocidade: 2,5 s; Ângulo de ataque: 105°; Corrente de soldagem: 140 A.*

Os testes realizados mostraram que a alteração feita no conjunto misturador parece ter favorecido a homogeneização da mistura gasosa. O limite de velocidade de soldagem ficou em torno de 1400 mm/min, assim como em testes já realizados anteriormente com a mistura A50 comercial (mesma composição da mistura A50).

### 10.2.2 Confirmação da eficiência do misturador

De maneira a confirmar a eficiência do misturador de forma mais consistente, foi realizada uma nova série de testes (série 27-1). Foram efetuadas soldagens em juntas em aresta mantendo a corrente em 140 A e variando a velocidade até atingir o limite superior. Os resultados para a série de testes 27-1 são mostrados na Tabela 10.2.

Tabela 10.2: Resultados da série de testes 27-1 (mistura A50)

| Teste | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|
| 27-1-1 | 1000 | 280 | 100% |
| 27-1-2 | 1200 | 280 | 100% |
| 27-1-3 | 1300 | 280 | 100% |
| 27-1-4 | 1400 | 280 | 80% (irregularidades) |
| 27-1-5 | 1300 | 280 | 100% |
| 27-1-6 | 1300 | 280 | 100% |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura gasosa A50 a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura gasosa A50 a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1,5 s; Rampa de velocidade: 2,5 s; Ângulo de ataque: 105°; Corrente de soldagem: 140 A.*

A alteração realizada no conjunto misturador parece realmente ter favorecido a homogeneização da mistura gasosa. O limite de velocidade de soldagem ficou em torno de 1300 mm/min (testes 27-1-3, 27-1-5 e 27-1-6), mantendo ainda uma ótima qualidade do cordão, como mostra a Figura 10.3, assim como nos testes realizados anteriormente com a mistura A50 comercial.

Figura 10.3: Aspecto do cordão de solda obtido nos testes 27-1-3, 27-1-5 e 27-1-6

### 10.2.3 Calibração da vazão fornecida pelo misturador

Como forma de verificar se as alterações implementadas no misturador poderiam ter modificado a calibração do programa “ROTO BR.xls”, foi feita uma re-calibração utilizado um bolhímetro como padrão. Foram especificadas quatro misturas gasosas diferentes e cada uma com um valor de vazão também diferente (dentro da faixa de medida do bolhímetro). Após ter-se ajustado o misturador para cada mistura, mediu-se 5 vezes a vazão fornecida e comparou-se com os valores ajustados. Os resultados da calibração são mostrados na Tabela 10.5 e a relação entre o valor da vazão real e a vazão especificada é apresentada na Figura 10.4. Os resultados foram bastante satisfatórios, ficando o valor da vazão real bem próximo do valor da vazão especificada no programa, o que reforça ainda mais a eficiência do novo conjunto misturador.

Tabela 10.5: Resultados da calibração do novo conjunto misturador

| Mistura | Vazão especificada (l/min) | Vazão real (l/min) |
|---|---|---|
| 90% Ar e 10% Ar | 5 | 4,82 |
| 70% Ar e 25% $CO_2$ e 5% $H_2$ | 7 | 7,05 |
| 95% Ar e 5% $CO_2$ | 8 | 7,95 |
| 95% Ar e 5% $H_2$ | 10 | 10,12 |

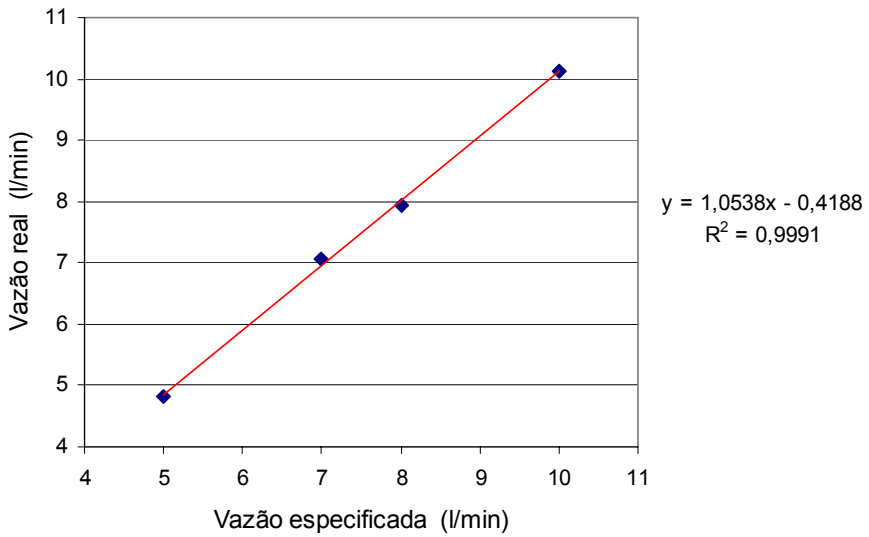



Figura 10.4: Relação entre a vazão real e a vazão especificada no novo conjunto misturador

De forma a assegurar que o novo conjunto misturador é capaz de garantir uma mistura eficiente (na proporção especificada), Rodrigues et al. (2005) realizaram análises químicas da composição de diversas misturas. Para tal, foi um utilizado um analisador de gás para misturas binárias, de fabricação da Thermco, modelo 9600, que apresenta, para a faixa percentual de aditivos adicionados ao Argônio neste trabalho (até 10%), um erro máximo de 0,3% em relação ao valor do percentual real do gás adicionado ao Argônio (para uma mistura de 5% de $O_2$ no Ar, o valor identificado pelo analisador vai ser de 4,7 a 5,3% de $O_2$, por exemplo). De acordo com Rodrigues et al. (2005), a nova configuração do misturador de gás funciona de maneira eficiente.

## 10.3 Conclusões

A partir das séries de testes realizadas neste capítulo, chegou-se à seguinte conclusão:

- A adição de uma segunda câmara de mistura parece realmente ter melhorado a eficiência do mecanismo de mistura dos gases de soldagem, haja vista que se utilizando uma mistura

gasosa feita no novo conjunto misturador, com os mesmos gases e nas mesmas proporções da mistura A50 comercial, obteve-se o mesmo limite superior da velocidade de soldagem que fora obtido outrora com a referida mistura comercial e com a mesma corrente de soldagem então utilizada.

# Capítulo XI

## Avaliação Final das Combinações de Argônio com Aditivo A

### 11.1 Objetivo

Neste capítulo é feita uma avaliação final, a nível laboratorial, do desempenho das misturas de Argônio e aditivo A como gás de plasma e/ou gás de proteção, com o intuito de confirmar os resultados obtidos anteriormente e definir a mistura a ser usada em futuros ensaios pilotos na soldagem a plasma de aço comum ao carbono. Um segundo objetivo foi verificar a possível variação de desempenho de misturas com maiores teores de aditivo A.

### 11.2 Soldagem dos corpos de prova e avaliação dos resultados

#### 11.2.1 Influência da combinação Mistura A50 comercial e Argônio

Baseado nos resultados apresentados em capítulos anteriores, a mistura A50 (já disponível comercialmente) mostrou-se a mais eficiente para as soldagens a plasma de aço comum ao carbono nas juntas e posições de soldagem experimentadas. Ficou a dúvida, porém, se o mesmo desempenho se manteria ao usar esta mistura só como gás de plasma ou só como gás de proteção, ficando a outra função por conta do Argônio puro. Alguns testes feitos no centro de pesquisa da financiadora deste presente trabalho indicam que, para soldagem a plasma "keyhole", o uso de Argônio puro como gás de plasma e da mistura A50 comercial como gás de proteção aumenta a eficiência do processo.

Para verificar esta possibilidade na junta em aresta com chapas de 1,5 mm de espessura, mas com a técnica "melt-in", primeiramente foi realizada uma série de testes (série 28-1) utilizando a mistura A50 comercial como gás de plasma e gás de proteção. A Tabela 11.1 mostra os resultados para esta série de testes, bem como os parâmetros utilizados.

Tabela 11.1: Resultados da série 28-1 (A50 comercial como gás de plasma e proteção)

| Teste | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|
| 28-1-1 | 1300 | 140 | 100% |
| 28-1-2 | 1400 | 140 | 100% |
| 28-1-3 | 1400 | 280 | 40% (irregularidades) |

| Teste | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|
| 28-1-4 | 1300 | 280 | 70% (irregularidades) |
| 28-1-5 | 1200 | 280 | 98% (irregularidades) |
| 28-1-6 | 1200 | 280 | 98% (irregularidades) |
| 28-1-7 | 1100 | 280 | 100% |
| 28-1-8 | 1100 | 280 | 100% |
| 28-1-9 | 1100 | 280 | 100% |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura A50 comercial a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1,5 s; Rampa de velocidade: 2,5 s; Ângulo de ataque: 105°; Corrente de soldagem: 140 A.*

O limite superior da velocidade de soldagem foi de 1100 mm/min (um pouco abaixo do limite esperado, que seria de 1300 mm/min, mas dentro da faixa de trabalho proposta para estas condições), como mostraram os testes 28-1-7, 28-1-8 e 28-1-9. O aspecto do cordão de solda obtido nesta velocidade é mostrado na Figura 11.1.

Figura 11.1: Cordão obtido na velocidade limite com a mistura A50 comercial (gás de plasma e proteção)

A próxima série de testes (série 28-2) foi realizada utilizando Argônio puro como gás de plasma e a mistura A50 comercial como gás de proteção. A Tabela 11.2 mostra os resultados para esta série de testes, bem como os parâmetros utilizados.

Tabela 11.2: Resultados da série 28-2 (A50 comercial como gás de proteção e Ar como plasma)

| Teste | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|
| 28-2-1 | 1100 | 140 | 70% (irregularidades) |
| 28-2-2 | 1000 | 130 | 100% |
| 28-2-3 | 1000 | 280 | 100% |
| 28-2-4 | 1000 | 130 | 0% (irregularidades) |
| 28-2-5 | 900 | 140 | 100% |
| 28-2-6 | 900 | 280 | 100% |
| 28-2-7 | 900 | 280 | 100% |
| 28-2-8 | 900 | 280 | 100% |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura A50 comercial a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: Ar a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1,5 s; Rampa de velocidade: 2,5 s; Ângulo de ataque: 105°; Corrente de soldagem: 140 A.*

O limite superior da velocidade de soldagem caiu para 900 mm/min, como mostraram os testes 28-2-5 a 28-2-8. O aspecto do cordão de solda obtido nesta velocidade é apresentado na Figura 11.2, mostrando uma pequena deterioração em relação ao cordão mostrado na Figura 11.1.

Figura 11.2: Cordão obtido na velocidade limite usando a mistura A50 comercial (proteção) e Ar (plasma)

A próxima série de testes (série 28-3) foi realizada utilizando a mistura A50 comercial como gás de plasma e o Ar puro como gás de proteção. A Tabela 11.3 mostra os resultados para esta série de testes, bem como os parâmetros utilizados.

Tabela 11.3: Resultados da série 28-3 (A50 comercial como gás de plasma e Ar como proteção)

| Teste | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|
| 28-3-1 | 1100 | 140 | 100% |
| 28-3-2 | 1200 | 130 | 50% (irregularidades) |
| 28-3-3 | 1100 | 280 | 80% (irregularidades) |
| 28-3-4 | 1000 | 280 | 100% |
| 28-3-5 | 1000 | 280 | 100% |
| 28-3-6 | 1000 | 280 | 100% |

*Constantes: Gás de Proteção: Ar a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura A50 comercial a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1,5 s; Rampa de velocidade: 2,5 s; Ângulo de ataque: 105°; Corrente de soldagem: 140 A.*

O limite superior da velocidade de soldagem foi de 1000 mm/min (testes 28-3-4, 28-3-5 e 28-3-6), um pouco maior do que o obtido na série de testes anterior, mas ainda aquém do valor alcançado na série de testes 28-1, definido na Tabela 11.1. O aspecto do cordão de solda obtido no limite da velocidade de soldagem é mostrado na Figura 11.3 e é semelhante ao mostrado na Figura 11.2.

Figura 11.3: Cordão obtido na velocidade limite usando a mistura A50 comercial (plasma) e Ar (proteção)

A Figura 11.4 resume os diferentes limites da velocidade de soldagem em função da combinação de gases (plasma e proteção) utilizada. Pode-se concluir que se consegue maior eficiência com o uso da mistura de Argônio e aditivo A tanto como gás de plasma como gás de proteção (o efeito é mais predominante como gás de plasma), contrariando a indicação para soldagens a plasma com “keyhole”.

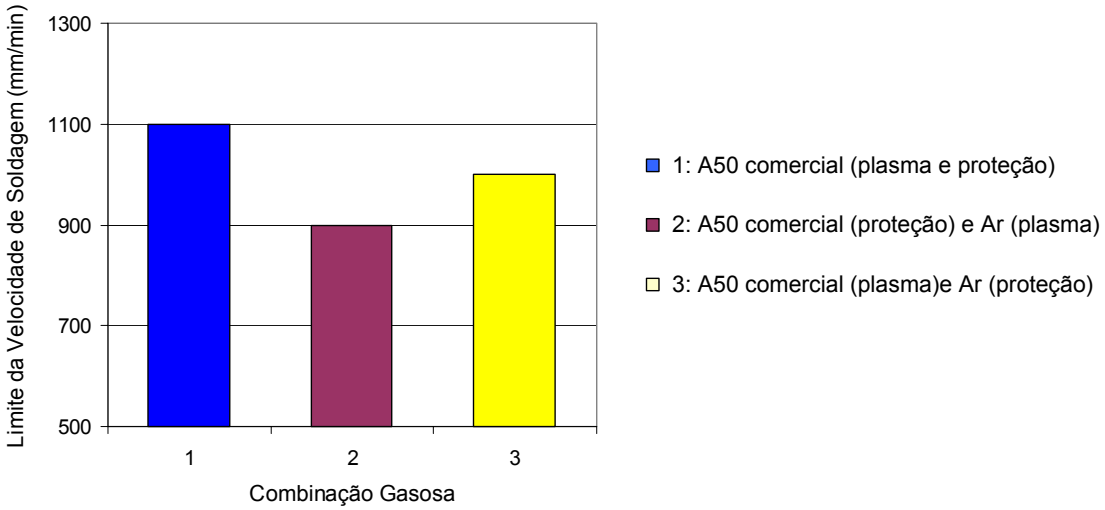



Figura 11.4: Limite de velocidade de soldagem em função da combinação de gases utilizada

### 11.2.2 Confirmação do efeito do aditivo A no desempenho da soldagem

Uma vez confirmado o melhor desempenho da mistura Argônio e aditivo A, e que o misturador de gases passou a funcionar de forma mais adequada (capítulo X), achou-se pertinente reavaliar o desempenho desta mistura binária com maiores teores de aditivo A.

Inicialmente foi empregada a mistura gasosa A50 para realizar a série de testes 29-1. Esta mistura foi feita com auxílio do misturador ao invés de usar a mistura A50 comercial, como no item anterior. Os resultados obtidos para esta série de testes são mostrados na Tabela 11.4.

Tabela 11.4: Resultados da série de testes 29-1 (mistura A50)

| Teste | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|
| 29-1-1 | 1100 | 140 | 100% |
| 29-1-2 | 1200 | 130 | 100% |
| 29-1-3 | 1300 | 140 | 100% |
| 29-1-4 | 1400 | 130 | 100% |
| 29-1-4 | 1500 | 280 | 95% (irregularidades) |
| 29-1-6 | 1500 | 280 | 95% (irregularidades) |
| 29-1-7 | 1400 | 280 | 60% (irregularidades) |
| 29-1-8 | 1300 | 280 | 100% |
| 29-1-9 | 1300 | 280 | 100% |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura gasosa A50 a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura gasosa A50 a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1,5 s; Rampa de velocidade: 2,5 s; Ângulo de ataque: 105°; Corrente de soldagem: 140 A.*

Num segundo momento, utilizou-se na série de testes 29-2 uma mistura gasosa denominada A70. Os resultados obtidos para esta série de testes são mostrados na Tabela 11.5.

Tabela 11.5: Resultados da série de testes 29-2 (mistura A70)

| Teste | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|
| 29-2-1 | 1300 | 150 | 100% |
| 29-2-2 | 1400 | 130 | 100% |
| 29-2-3 | 1500 | 140 | 100% |
| 29-2-5 | 1600 | 120 | 100% |
| 29-2-5 | 1700 | 140 | 100% |
| 29-2-6 | 1800 | 130 | 100% |
| 29-2-7 | 1900 | 150 | 100% |
| 29-2-8 | 2000 | 130 | 100% |
| 29-2-9 | 2000 | 280 | 95% (irregularidades) |
| 29-2-10 | 1900 | 280 | 100% |
| 29-2-11 | 1900 | 280 | 95% (irregularidades) |
| 29-2-12 | 1800 | 280 | 98% (irregularidades) |
| 29-2-13 | 1700 | 280 | 100% |
| 29-2-15 | 1700 | 280 | 100% |
| 29-2-15 | 1700 | 280 | 100% |
| 29-2-16 | 1700 | 280 | 100% |
| 29-2-17 | 1700 | 280 | 100% |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura gasosa A70 a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura gasosa A70 a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1,5 s; Rampa de velocidade: 2,5 s; Ângulo de ataque: 105°; Corrente de soldagem: 140 A.*

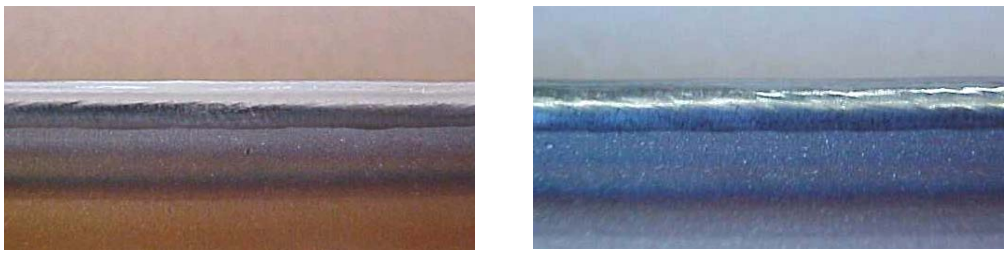
Finalmente, utilizou-se a mistura gasosa A100 feita ainda com o auxílio do misturador para a próxima série de testes (série 29-3). Os resultados obtidos para esta série de testes são mostrados na Tabela 11.6.

Tabela 11.6: Resultados da série de testes 29-3 (mistura A100)

| Teste | Velocidade (mm/min) | Comprimento do cordão (mm) | Aceitabilidade do cordão |
|---|---|---|---|
| 29-3-1 | 1700 | 280 | 100% |
| 29-3-2 | 1900 | 280 | 100% |
| 29-3-3 | 2100 | 280 | 100% |
| 29-3-4 | 2300 | 280 | 100% |
| 29-3-5 | 2500 | 280 | 90% (irregularidades) |
| 29-3-6 | 2300 | 280 | 95% (irregularidades) |
| 29-3-7 | 2200 | 280 | 100% |
| 29-3-8 | 2200 | 280 | 100% |
| 29-3-9 | 2200 | 280 | 100% |
| 29-3-10 | 2200 | 280 | 100% |

*Constantes: Gás de Proteção: mistura gasosa A100 a uma vazão de 10,6 l/min; Gás de Plasma: mistura gasosa A100 a uma vazão de 0,7 l/min; Diâmetro do eletrodo: 5 mm; Afastamento do eletrodo: 0,8 mm; Ângulo da ponta do eletrodo: ≈ 33°; Distância da tocha à peça: 3,5 mm; Retardo: 1,5 s; Rampa de velocidade: 2,5 s; Ângulo de ataque: 105°; Corrente de soldagem: 140 A.*

A Figura 11.5 mostra que os aspectos dos cordões não se alteram com o crescimento do teor de aditivo A na mistura.



Mistura A70 Mistura A100

Figura 11.5: Cordões obtidos na velocidade limite com misturas de Argônio e aditivo A

Os resultados apresentados nas Tabelas 11.4, 11.5 e 11.6 podem ser melhor analisados pelo gráfico mostrado na Figura 11.6. Como pode ser observado, a adição de um maior teor do aditivo A ao Argônio permitiu elevar o limite superior da velocidade de soldagem para até 2200 mm/min, sem comprometer em nada a conformidade dos cordões de solda.

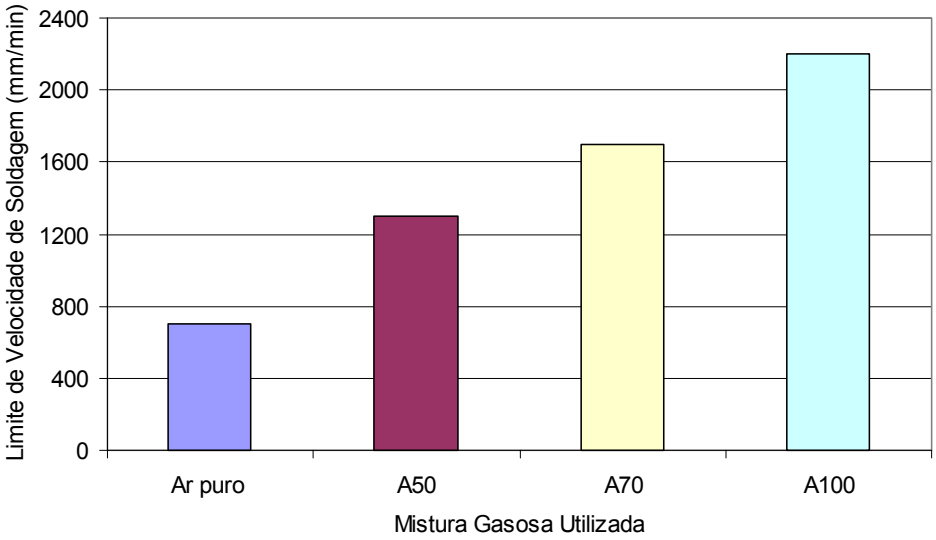



Figura 11.6: Evolução do limite de velocidade em função do teor de aditivo A utilizado

Desta forma, o resultado do uso de um maior teor de aditivo A foi bastante satisfatório, sugerindo que a mistura padrão para um possível ensaio piloto deva ser a mistura A100.

## 11.3 Conclusões

A partir das séries de testes realizadas neste capítulo, chegou-se às seguintes conclusões:

- Ficou comprovada a eficácia de uma mistura de Argônio e aditivo A, como gás de plasma e gás de proteção, para soldagens a plasma de elevada produtividade em aço ao carbono;
- O uso de Argônio puro, seja como gás de plasma, seja como gás de proteção, diminui a eficiência do processo;
- Quanto maior o teor de aditivo A na mistura, maior é a velocidade de soldagem alcançada para uma mesma corrente.