

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

EZEQUIEL GONÇALVES

UMA METODOLOGIA DE COMPARAÇÃO ENTRE OS PROCESSOS DE
SOLDAGEM TIG E PLASMA

FLORIANÓPOLIS

2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

EZEQUIEL GONÇALVES

UMA METODOLOGIA DE COMPARAÇÃO ENTRE OS PROCESSOS DE
SOLDAGEM TIG E PLASMA

**Trabalho de Graduação apresentado ao
Curso de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Engenheiro Mecânico.**

Orientador: Régis Henrique Gonçalves e Silva Dr. Eng.

FLORIANÓPOLIS

2012

EZEQUIEL GONÇALVES

UMA METODOLOGIA DE COMPARAÇÃO ENTRE OS PROCESSOS DE
SOLDAGEM TIG E PLASMA

Este Trabalho de Graduação foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Mecânico e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Professor Lauro Cesar Nicolazzi
Coordenador do Curso

Dylton do Vale Pereira Filho, M. Sc.
Professor disciplina

Comissão Examinadora:

Régis Henrique Gonçalves e Silva, Dr. Eng.
Orientador

Jair Carlos Dutra, Prof. Dr. Eng.
Membro

Dylton do Vale Pereira Filho, M. Sc.

Membro

Ficha Catalográfica

Gonçalves, Ezequiel, 1989 –

Uma metodologia de comparação entre os processos de soldagem TIG e Plasma,
Ezequiel Gonçalves - 2012.

85 f. : il. color.; 30cm.

Orientador: Regis Henrique Gonçalves e Silva, Dr. Eng.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Universidade Federal de
Santa Catarina, Curso de Engenharia Mecânica, 2012.

1. Solda a ponto 2. Soldagem por resistência 3. Lente de Solda
I. Raul Gorh Jr. II. Universidade Federal de Santa Catarina, Curso de
Engenharia Mecânica, III. Restauração e validação experimental de um
equipamento de soldagem a ponto por resistência

*Ao meu irmão Victor, que durante
toda a graduação esteve sempre presente.
Mais que um irmão, amigo e
companheiro. Valeu Vital!*

Agradecimentos

Ao Labsolda, pela experiência de aprendizado durante a graduação, além de oportunidade de desenvolver este trabalho.

Ao orientador Raul Gorh Junior, e ao co-orientador Regis Henrique Gonçalves e Silva, pelo apoio e orientação no desenvolvimento do trabalho.

Ao professor Dr. Eng. Jair Carlos Dutra, pelo apoio, críticas, ensinamentos e além de tudo, insistência nos trabalhos realizados.

À Marcia Paula Thiel, secretária e companheira de trabalho do Labsolda, por sua dedicação e paciência.

A toda equipe do Labsolda, pela convivência e favores trocados durante os trabalhos realizados no laboratório, além das divertidas horas de churrascos e futebol.

Aos meu pai e mãe Victor e Sonia, pelo carinho e incentivo em todas as etapas de minha vida.

Ao meu irmão Hugo, pela parceria e companheirismo nas viagens, pedaladas e experiências vividas juntos.

A Juliana Okawati, pelo carinho, compreensão e incentivo durante o trabalho e graduação.

Aos amigos e colegas de curso, em especial Nilo Lopes, Murilo Boseli, Cristian Zwirtes, Guilherme Lopes, Afonso Rauh, Luis Alexandre Calado (Bisteca) e Mariano Villafañe, pessoas ao qual sem elas não teria chegado até aqui.

Muito obrigado a todos.

Resumo

O processo de soldagem por resistência, em especial soldagem a ponto, é um processo bastante presente em diversos setores da indústria. Em setores tais como automotivo e utensílios culinários, este processo é fundamental, por exemplo, um carro pode apresentar até 5000 (cinco mil) pontos de solda. Em cima desta tecnologia, muitas pesquisas são realizadas, principalmente na área de simulação e desenvolvimento de eletrodos. Assim sendo, este trabalho apresenta uma oportunidade ao Labsolda, bem como ao Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC (EMC), em iniciar uma nova linha de P&D (Pesquisa e Desenvolvimento), uma vez que, atualmente, nenhuma pesquisa é desenvolvida nesta área. Foi feita a restauração de um equipamento de soldagem por resistência que se encontrava em inatividade desde meados dos anos noventa. Serão apresentadas as modificações feitas no equipamento, tanto de manutenção quanto melhorias, além de uma validação experimental do mesmo. Os experimentos têm como objetivo efetivar a aplicação do equipamento para pesquisas futuras. Este trabalho engloba diversas áreas de engenharia, tais como usinagem, pneumática, elétrica, projetos, refrigeração e soldagem, uma vez que novos eletrodos foram projetados e usinados; o sistema pneumático passou por manutenção e aprimoramento; uma nova fonte de potencia foi instalada; um sistema de refrigeração foi integrado a máquina, além de outras atividades.

Palavras chave: 1. Soldagem a ponto; 2. Soldagem por resistência elétrica; 3. Equipamento de solda a ponto.

Abstract

The resistance welding process, specially the spot welding, is a process which has been used in many sectors of industries. Sector as automotive and culinary, this process is primordial, for example, a car can show almost five thousand spot welds. Many developments and researches are made over this process, principally at simulations such as electrode geometry developments. At this way, this study shows an opportunity to Labsolda, such as to the Mechanical Engineer Department of UFSC (EMC), to provide a new R&D (Research and Development), once currently, none researched is done at this area. It was made a restoration over a resistance welding equipment, which was in inactivity since mid-nineties. It will be shown modifications made over the equipment such as optimization, besides an experimental validation. The experimentation has as objective to effect the application of this equipment in future researches. This study involves many sectors of engineering such as milling, pneumatic, electric, refrigeration, projects and welding, once new electrodes were developed; the pneumatic system were restored; a new power source was installed, the refrigeration system was integrated to the equipment, besides other activities.

Keywords: 1. Spot Welding; 2. Resistance Welding; 3. Resistance spot welding equipment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema tempo de um ciclo simples de soldagem a ponto. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 2 - Gráficos de resistência e temperatura de acordo com a localização no circuito diagramado [Welding Handbook, 1991 modificado]. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 3 - Circuito típico de máquinas monofásicas [Welding Handbook, 1991, modificado].
..... **Erro! Indicador não definido.**

Figura 4 – Esquema de uma máquina de solda a ponto por resistência [Heureux & Belotte, 1968, modificado]..... **Erro! Indicador não definido.**

Figura 5 - Típicas geometria de eletrodo para solda ponto - RWMA. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 6 – Vista de corte de um eletrodo genérico - Geometria.**Erro! Indicador não definido.**

Figura 7 - Gráficos Densidade de Corrente x Distância do centro da face e Razão de Corrente x Ângulo de cone [Bowers *et al.* 1990] **Erro! Indicador não definido.**

Figura 8 – Geometria *Pimple* (___) e *Pimple* Modificado (___).**Erro! Indicador não definido.**

Figura 9 – Esquema de refrigeração do eletrodo [Aures, 2006].**Erro! Indicador não definido.**

Figura 10 – Geometria do ponto de solda: (h) indentação, (t) penetração da lente, (d) diâmetro da lente, (Dhaz) ZTA, (x) *gap* entre as peças. [Manual Ruukki, 2009]. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 11 – Gráficos Resistência de contato x Força e Relação entre Força de soldagem (F), espessura de chapa e diâmetro do eletrodo (D) para chapas de aço baixo carbono. [Machado, 1996]..... **Erro! Indicador não definido.**

Figura 12 – Ciclos de soldagem a ponto por resistência [ASM, 1971]. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 13 - Curva de Soldabilidade genérica para: A - Material não revenido; B - Material Zincado com revestimento leve; C - Material zincado com revestimento pesado.**Erro! Indicador não definido.**

Figura 14 - Curva de soldabilidade otimizada. [Ruukki Manual, 2009]. .. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 15 - Representação do Efeito *Shunt* [Vargas, 2006, modificado].. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 16 - Controlador SCR para máquinas monofásicas [AWS, 1991]. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 17 - Relação entre corrente rms e angulo de atraso [AWS, 1991]. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 18 - Antigo controle eletrônico (Ignitrons). **Erro! Indicador não definido.**

Figura 19 - Máquina de Solda Ponto da *ARO Spot Welding*. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 20 - Desenho esquemático do Cilindro. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 21 – Válvula direcional **Erro! Indicador não definido.**

Figura 22 - Diafragma. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 23 - Válvula montada com peça em nylon nova. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 24 - Filtro Regulador de ar [Morbach.com.br modificado]**Erro! Indicador não definido.**

Figura 25 - Gráfico pressão x Força do pistão..... **Erro! Indicador não definido.**

Figura 26 - Esquema braço de alavanca do sistema **Erro! Indicador não definido.**

Figura 27 - Gráfico Força dos eletrodos x Pressão do sistema.. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 28 - Circuito Pneumático do equipamento..... **Erro! Indicador não definido.**

Figura 29 – Fonte e Interface de controle..... **Erro! Indicador não definido.**

Figura 30 - Aquisição da corrente com diferentes razões de corte e tempos de soldagem. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 31 – Dispositivo de Disparo..... **Erro! Indicador não definido.**

Figura 32 - Eletrodos usinados em liga de CuCrZr. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 33 - Bancada de ensaios. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 34 - Gráfico Corrente eficaz (I_e) x Razão de corte (A_i). **Erro! Indicador não definido.**

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos Materiais - RWMA.....	Erro! Indicador não definido.
Tabela 2 - Propriedades da Liga RWMA classe 2 - CuCrZr.....	Erro! Indicador não definido.
Tabela 3 - Propriedades da liga ASTM A36.	Erro! Indicador não definido.
Tabela 4 - Parametrização dos ensaios	Erro! Indicador não definido.
Tabela 5 - Parâmetros dos ensaios A.....	Erro! Indicador não definido.
Tabela 6 - Parâmetros dos ensaios B.....	Erro! Indicador não definido.
Tabela 7 - Parâmetros dos ensaios C.....	Erro! Indicador não definido.

LISTA DE SIMBOLOS E NOTAÇÕES

A	Ampere
AC	Alternating Current
AWS	American Welding Society
cm	Centímetro
°C	Celsius
DBCP	Distância bico de contato-peça
DC	Corrente Contínua
DEP	Distância eletrodo-peça
ER	Eletrodo revestido
FCAW	Flux-cored Arc Welding
ft ³	Cubic feet
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
H ₂	Gás hidrogênio
Hz	Hertz
I	Corrente (A)
in.	inch
K	Kelvin
kVA	quilo Volt-Ampere
l	Litro
Lc	Comprimento de constrição
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
min	Minuto

mm	Milímetro
mm ²	Milímetro quadrado
MPa	Mega Pascal
Nital	Mistura de ácido nítrico e álcool
Pa	Pascal
PAW	Plasma Arc Welding
PTA-P	Plasma Transfere
Re	Reco do eletrodo
s	Segundo
SAP	Sistema de Aquisição de Parâmetros
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
TIG	Tungsten Inert Gás
V	Volt
ZTA	Zona termicamente afetada
W	Watts
W	Símbolo do tungstênio

Sumário

1. Introdução.....	16
1.1. Objetivos.....	17
1.2. Justificativa.....	18
2. Fundamentação Teórica.....	19
2.1. Processo TIG.....	19
2.1.1. Histórico.....	19
2.1.2. Princípios de funcionamento.....	20
2.1.3. Tochas.....	22
2.1.4. Eletrodos.....	22
2.1.5. Fontes de energia para soldagem.....	23
2.1.6. Gás de proteção.....	24
2.1.7. Aplicações e potencialidades.....	25
2.2. Processo Plasma.....	26
2.2.1. Histórico.....	26
2.2.2. Princípios de Funcionamento.....	26
2.2.3. Tochas.....	28
2.2.4. O arco piloto.....	29
2.2.5. Gases do processo.....	30
2.2.6. Modos de operação.....	31
2.2.7. A constrição do arco como vantagem sobre o TIG.....	33
2.2.8. Aplicações e potencialidades.....	39
3. Metodologia.....	41
3.1. Tocha Binzel Aut WIG 400W.....	42
3.2. Tocha TBi PLP 300.....	43
3.3. Tocha Labsolda PTS 3.....	44
3.4. Tocha Plasma-Master PP-6-01.....	45
3.5. Tocha MIG.o.MAT PMW 350.....	46
3.6. Tocha Thermal Dynamics PWM 300.....	48
3.7. Fonte de soldagem IMC Digiplus A7.....	48

4. Resultados.....	51
4.1. Adaptação do bocal.....	51
4.2. A influência do gás adicional.....	53
4.3. A tensão de soldagem.....	54
4.4. A geometria da solda.....	59
5. Conclusão.....	62
6. Propostas e recomendações para trabalhos futuros.....	64
Referências.....	65

1. Introdução

A busca pela qualidade total nas indústrias de fabricação tem se tornado um diferencial e um meio de garantir espaço em um mercado com alta competitividade inclusive com fabricantes de outros países. Para assegurar essa qualidade, a escolha do processo de fabricação se torna fator importante como meio de suprir os principais requisitos buscando quase sempre a maior produtividade. Para o trabalho com metais a soldagem a arco se destaca como um processo amplamente utilizado tanto na fabricação quanto recuperação de peças seja desde pequenos componentes eletrônicos até grandes estruturas como pontes e navios.

Dentre as inúmeras opções de soldagem a arco, destaca-se uma vertente que utiliza um eletrodo de tungstênio não consumível. Dessas, duas são mais representativas o Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), também conhecido como Tungsten Inert Gás (TIG) e o Plasma Arc Welding (PAW), chamado comumente de Plasma somente.

O TIG, inventado segundo alguns autores em 1930, utiliza um arco voltaico mediante uma atmosfera inerte para gerar calor que é utilizado para a fusão de metais. Como algumas vantagens podemos citar a elevada qualidade da união e a capacidade de soldar quase que a totalidade dos metais e suas ligas. Já como limitações temos a espessura da chapa que pode ser unida sem a adição de material e a necessidade da alimentação automática de arame em substituição a forma manual em operações que exigem alta produtividade.

O Plasma é um processo mais recente, tido pela maioria como uma variação benéfica do GTAW, também utiliza um eletrodo de tungstênio para gerar calor, porém é utilizado um gás extra que após ser ionizado é forçado a passar por um orifício de pequeno diâmetro o que faz aumentar sua rigidez e velocidade. Essas novas características do jato de plasma permitem a esse processo soldar, sem a adição de material, chapas com até 10 mm de espessura, além de garantir uma união com menores níveis de tensão residual, que podem gerar distorções, e menor largura do cordão de solda. Porém os equipamentos para a soldagem Plasma, como a tocha, por exemplo, são mais complexos e com maior número de componentes o que torna sua aquisição mais cara e a necessidade de mão de obra mais qualificada para a operação e desenvolvimento de parâmetros de soldagem.

Por ser um processo descoberto há pouco tempo, se comparado aos outros processos convencionais de soldagem, e ter seu uso historicamente relacionado a indústrias de alta tecnologia como a aeronáutica e aeroespacial, ainda não foi possível explorar toda a sua

potencialidade. Aos poucos o Plasma vai ganhando espaço mediante a difusão de informações a respeito de suas vantagens como maior potência do arco, uma maior concentração de energia em uma pequena área (densidade de energia) e menor largura e maior penetração da solda devido à colimação do arco.

Partindo do pressuposto de que o processo Plasma surgiu de uma derivação do TIG comparações entre esses dois são inevitáveis. Essas informações disponibilizadas pela literatura são tão importantes que muitas vezes servem de base para a escolha de um ou de outro processo para determinada aplicação. Por isso é preciso um estudo detalhado das principais características de cada processo para que se possam levantar quais são os parâmetros e variáveis significativos em cada um.

Dessa forma, seria possível realizar uma verdadeira comparação em que os dois estejam sobre as mesmas condições, dentro dos limites e peculiaridades de cada um, para criar condições de avaliar suas vantagens e desvantagens e fornecer informações confiáveis que serviriam de material de consulta para a tomada de decisões. É nesse contexto que o presente trabalho busca contribuir, não como uma fonte de pesquisa absoluta, mas como um fornecimento de carácter prático e científico ao infinito conhecimento da tecnologia da soldagem.

1.1. Objetivos

A principal motivação deste trabalho que a torna agora como objetivo é realizar uma comparação entre os processos TIG e Plasma, mediante a análise de suas características para proporcionar uma metodologia adequada. Essa metodologia deve primar pela imposição de igualdade de variáveis iniciais para que seja possível avaliar as verdadeiras diferenças proporcionadas pela constrição do arco na soldagem Plasma.

Como forma de comparação será avaliada a geometria do cordão de solda, através da análise de macrografias com uso de software para a medição da largura e penetração do material fundido. O parâmetro derivável nos ensaios será a distância entre eletrodo e peça para se medir a sua influência sobre a tensão do arco de uma tocha convencional TIG e cinco tochas Plasma: TBI PLP 300, PTS 3, PP-6-01, PMW 350 e PWM 300.

Observar uma possível influência do comprimento do canal de constrição sobre a colimação e potência do arco. Estabelecer para as quatro diferentes tochas a mesma potência do arco e avaliar quais são as diferenças relacionadas à distância entre eletrodo e peça.

1.2. Justificativas

Quando se compara diferentes processos de soldagem, muitas vezes, apenas o valor corrente é considerado, fazendo com que a própria metodologia de análise empregada já apresente vantagens para algum processo em detrimento dos outros. As comparações entre TIG e Plasma não são diferentes. Muito se fala de que a maior potência do arco Plasma deve-se exclusivamente ao confinamento do arco e que esse mesmo processo apresenta menor influência de possíveis variações do comprimento do arco. Porém, muitos ao realizar tal comparação acabam utilizando a distância entre eletrodo e peça para o TIG igual à distância bico de contato peça para o Plasma o que devido à característica construtiva desse último já resultaria em uma maior tensão do arco como consequência do recuo do eletrodo.

Outros trabalhos tratam de engrandecer tal processo comparado ao outro puro e simplesmente para salientar a importância do processo que será usado no decorrer das atividades. Assim com o uso de metodologias diferentes e critérios de avaliação muitas vezes equivocados, como por exemplo, a taxa de deposição para comparações entre o processo Plasma keyhole que não utiliza material de adição e o MIG/MAG cujo eletrodo é o próprio arame adicionado, é possível usar os resultados dos ensaios para concordar com a tese defendida.

Partindo da filosofia adotada no Laboratório de Soldagem da Universidade Federal de Santa Catarina (LABSOLDA/UFSC), de que o avanço tecnológico e sua nacionalização só acontecem de forma sólida quando uma técnica é estudada de forma a oferecer equipamentos e conhecimento suficiente para executá-la, esse trabalho se faz necessário para avaliar de forma imparcial, sem suposições iniciais de superioridade, os processos em questão. Assim seria possível oferecer as informações confiáveis sobre as características e particularidades de cada processo tornando a atividade de escolha desses processos de soldagem baseadas em resultados.

2. Fundamentação Teórica

2.1. Processo TIG

2.1.1. Histórico

Existem muitos relatos sobre a origem do processo de soldagem TIG (tungsten inert gas), segundo a AWS (American Welding Society) a possibilidade do uso de hélio como gás de proteção da poça de fusão gerada pelo estabelecimento de um arco elétrico entre um eletrodo de tungstênio e uma peça foi primeiramente investigada em 1920. Porém nada de mais completo foi feito até a Segunda Guerra Mundial. Os créditos da invenção do processo TIG, semelhante ao usado atualmente, é dado a Hobart e Devers sendo que o processo não foi utilizado comercialmente devido ao alto custo dos gases inertes, argônio e hélio (1). As necessidades impostas pela segunda grande guerra foram decisivas para o desenvolvimento desse processo.

Primeiramente o TIG foi usado para a soldagem de alumínio e magnésio em substituição aos rebites na indústria aeronáutica e atualmente pode ser empregado para a união de quase todos os metais e suas ligas. Foi em 1941 que Russell Meredith e V.H. Pavlecka desenvolveram um dispositivo prático capaz de fixar o eletrodo de tungstênio e suprir o fluxo de gás inerte para a proteção do eletrodo, da poça de fusão e do material de base adjacente, dando origem à primeira tocha de soldagem TIG. O suprimento de gás se dava através de um bocal envolvente ao eletrodo, possibilitando a proteção quando a tocha era movimentada ao longo da união. Mesmo o hélio sendo o gás mais utilizado, tanto que em 1942 Meredith emitiu nova patente tornando o processo conhecido como “Soldagem a Arco com Gás Hélio”, logo cedeu espaço para o argônio devido as suas características favoráveis de estabilidade do arco voltaico e principalmente pelo menor custo.

Durante as primeiras aplicações, a soldagem TIG era realizada com polaridade positiva do eletrodo e corrente constante, isso para possibilitar a limpeza da camada de óxido do magnésio e do alumínio que até hoje são desafios da área de fabricação, já que a camada de óxido possui uma temperatura de fusão mais elevada que material base. Mas essa configuração com eletrodo positivo tinha a desvantagem de apresentar a maior parcela de calor no próprio eletrodo o que causa a sua deterioração mais rápida. Essa dificuldade logo foi superada pelo uso de fontes que possibilitavam a mudança de polaridade assim a limpeza da camada de óxido era realizada durante o tempo de eletrodo positivo e a penetração do cordão de solda era garantida durante o tempo de eletrodo negativo. Desde a sua invenção, diversos desenvolvimentos no processo e nos

equipamentos que o compõe foram realizados. As fontes de energia possibilitam maior controle da corrente de soldagem diante dos avanços da eletrônica, a pulsação da corrente pode ser feita ao mesmo tempo em que uma mudança de polaridade. As tochas ao serem refrigeradas, seja por água ou gás, aumentaram o limite de corrente do processo. Os eletrodos podem ser fabricados com a mistura de materiais ao tungstênio dando origem a ligas que facilitam a emissão de elétrons, aumentam a estabilidade do arco e a vida do eletrodo. Como gás de proteção pode ser usado misturas específicas para cada aplicação com diferentes porcentagens de hélio e hidrogênio adicionadas ao argônio. Além dos avanços da automação e da robótica, que auxiliam no movimento relativo entre tocha e peça e no controle do comprimento do arco.

2.1.2. Princípios de funcionamento

O processo GTAW (gas tungsten arc welding), como é chamado o TIG pela AWS, fornece o calor para a fusão do metal de base através do estabelecimento de um arco voltaico entre um eletrodo não consumível, na maioria das vezes de tungstênio, e a própria peça. Esse arco voltaico, que pode ser em corrente contínua ou alternada, é formado em meio de gás inerte, que tem a função de proteger contra a oxidação o próprio eletrodo, a poça de fusão e as regiões de solidificação, além de facilitar a criação do caminho para a passagem da corrente elétrica. De forma usual, quando é utilizada a corrente contínua, o eletrodo é ligado ao terminal negativo da fonte de energia sendo a peça o terminal positivo. Dessa forma se consegue maior estabilidade do processo bem como menor calor transportado ao eletrodo. Devido as suas características construtivas o TIG é considerado um processo de baixa densidade de potência como é mostrado na Tabela 1.

Processo	Densidade de potência (W/cm ²)
TIG	10 ² - 10 ⁴ [11]
	10 ³ - 10 ⁴ [33]
MIG	10 ³ - 10 ⁴ [33]
Plasma	10 ³ - 10 ⁶ [11]
	10 ⁴ - 10 ⁵ [33]
Feixe de elétrons	10 ⁵ - 10 ⁸ [11]
	10 ⁶ - 10 ⁹ [33]
Laser	10 ⁵ - 10 ⁷ [11]
	10 ⁶ - 10 ⁹ [33]

Tabela 1 – Fontes de calor e respectivas densidades de potência reproduzida de Silva, 2010.

Nessa polaridade, o eletrodo (cátodo) emite elétrons que são acelerados durante o percurso até a peça (ânodo). Para que o cátodo possa emitir elétrons é preciso uma quantidade de energia, chamada de função trabalho, assim quando os elétrons colidem com a peça eles liberam essa energia causando a fusão do metal. Outra forma de energia, cerca de 30%, gerada pelo arco elétrico é transportada pelos íons positivos do gás até o cátodo, por essa razão que a maior parcela de calor é direcionada a peça quando o eletrodo é o polo negativo do sistema de soldagem. Porém quando o eletrodo é o cátodo, não temos o fenômeno conhecido como limpeza catódica o que dificulta a soldagem de materiais como o alumínio e o magnésio que possuem camadas de óxidos em sua superfície e a utilização do eletrodo como ânodo aumenta o seu desgaste e perda de geometria, já que agora os elétrons são emitidos pela peça e chocam-se como o eletrodo, de forma a dificultar a abertura e estabilidade do arco.

Diante desse fenômeno, surgiu a modalidade de corrente alternada assim as principais características de cátodo e ânodo seriam atendidas: durante o período de eletrodo positivo é feita a limpeza da superfície da peça e durante o período de eletrodo negativo é entregue a peça a maior parcela do calor que possibilite a sua fusão.

Para que se trabalhe com o processo TIG são necessários no mínimo:

- uma tocha de soldagem apropriada.
- um eletrodo, na maioria das vezes de tungstênio e suas ligas.
- uma fonte de energia.
- gás de proteção.

Abaixo, Figura 1, é mostrada uma bancada típica de trabalho TIG com detalhe da tocha.

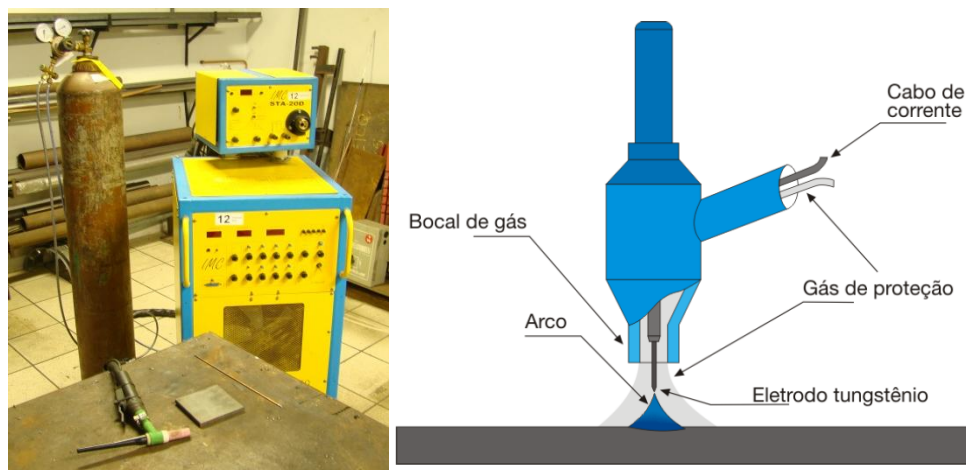


Figura 1 – Bancada de trabalho TIG e detalhe da tocha de soldagem

2.1.3. Tochas

A principal função da tocha de soldagem é fixar o eletrodo e proporcionar um caminho para o levar o gás de proteção até a poça de fusão. Para isso ela deve conter um meio condutor para a passagem da corrente elétrica e garantir um fluxo de gás com continuidade e vazão necessária para a proteção durante toda a movimentação ao longo da junta, tudo isso de forma a manter o operador isolado eletricamente. As tochas para a soldagem manual possuem geralmente um ângulo de 120° entre o cabo e o eletrodo para facilitar a operação, algumas contêm ainda dispositivos para controle da corrente e da vazão de gás durante a soldagem. Para fixar o eletrodo é necessário o uso de uma pinça, acoplada a um porta pinça e pressionada com o manuseio da capa da pinça. Para a saída do gás de proteção a tocha possui um suporte para o bocal onde é fixado um bocal, geralmente de cerâmica, que pode ter diversas geometrias de acordo com as características geométricas da união e do gás de proteção utilizado. A maioria das tochas para uso em até 200 A são resfriadas pelo próprio ar atmosférico circundante, já para o uso em correntes até 500 A, tipicamente, ou mais, a tocha é fabricada contendo um circuito de refrigeração onde é feito passar água até a região com maior incidência de calor (perto do bocal e do eletrodo) por meio do uso de unidades de refrigeração que, por exemplo, fazem uso do sistema reservatório-radiador-bomba.

2.1.4. Eletrodos

Quando nos referimos aos eletrodos para o processo TIG, citamos apenas o tungstênio, mas os eletrodos puros com 99,5% de W, tem menor capacidade de emissão de elétrons e baixa resistência a contaminação e para melhorar essas características são adicionados elementos de liga. Os elementos mais utilizados são tório, zircônio, lantânio e cério.

Quando se adiciona pequenas quantidades de tório ao eletrodo, 1 ou 2% comercialmente, sua capacidade de emissão de elétrons aumenta e conseqüentemente o valor de corrente suportado também. Esse aumento de corrente de trabalho chega a ser 20% maior se comparado a um eletrodo puro. Com isso aumenta-se a resistência a contaminação bem como a vida do eletrodo. O tório é o único radioativo dos quatro elementos de liga citados, o que pode representar problemas a saúde se for armazenado em condições adversas severas, nas soldagens em ambientes confinados e durante a afiação. De maneira geral a quantidade de tório é insuficiente para causar patologias.

A adição de óxido de zircônio ao tungstênio confere ao eletrodo características intermediárias entre o eletrodo puro e o ligado ao tório. A principal vantagem do uso do zircônio é o aumento da vida útil, devido ao aumento da resistência a contaminação, o que o torna uma boa solução para a soldagem do alumínio em corrente alternada. O lantânio e o cério diminuem a taxa de vaporização do eletrodo, aumentando sua vida, e são utilizados em correntes contínua e alternada.

Com relação ao ângulo de afiação, ângulos maiores tendem a diminuir a largura do cordão de solda e aumentarem a penetração. Uma ponta de eletrodo bem afiada facilita a operação de abertura do arco voltaico, mas essa afiação vai perdendo forma no decorrer do tempo de soldagem devido ao calor gerado, principalmente em correntes elevadas, que tende a fundir o eletrodo dando uma forma arredondada a sua ponta. Já o diâmetro do eletrodo utilizado está diretamente ligado ao valor de corrente a ser trabalhado, sendo que para eletrodo positivo é necessário um diâmetro maior, para o mesmo nível de corrente, do que para eletrodo negativo já que a ponta não é resfriada pela emissão de elétrons e sim aquecida pelo impacto dos mesmos.

2.1.5. Fontes de energia para soldagem

Uma fonte de soldagem deve basicamente ser capaz de receber energia elétrica, na maioria da rede elétrica disponibilizada, e fornecer como saída corrente e tensão adequada ao tipo de soldagem. Essa adequação pode incluir o formato da saída, constante ou pulsada, e a polaridade, contínua ou alternada. Os valores de tensão e corrente em regime estão na faixa de 10 a 40V e 10 e 1200A, respectivamente. Nos últimos anos com os avanços nos estudos dos semicondutores e desenvolvimento dos sistemas eletrônicos houve um crescimento significativo na forma de construção das fontes de soldagem. Podemos separar em dois tipos: as fontes convencionais e as eletrônicas.

Nas fontes convencionais a energia elétrica da rede precisa ser transformada de uma tensão alternada e relativamente alta para uma tensão com valores mais baixos, adequada ao processo de soldagem e segura para o operador. Essa redução geralmente é feita por um transformador comum e se a aplicação demandar por tensão contínua é usados retificadores. Fundamentalmente o funcionamento de uma fonte de soldagem depende de suas características estáticas e dinâmicas. As características estáticas estão relacionadas com os valores médios de tensão e corrente na saída da fonte. Para a soldagem TIG são utilizadas, geralmente, fontes de

corrente constante onde o operador determina a corrente a ser usada e varia a tensão de acordo com a distância entre o eletrodo e a peça. Já as características dinâmicas estão relacionadas com as mudanças durante a soldagem que podem envolver intervalos de tempo muito pequenos. Essas características são mais relevantes na etapa de abertura do arco, nas rápidas mudanças do comprimento do arco e no uso de corrente alternada nas etapas de extinção e reabertura do arco em cada variação de polaridade.

As fontes eletrônicas utilizam dispositivos de mesmo nome para controlar a saída da fonte em detrimento dos sistemas mecânicos e elétricos das fontes convencionais o que confere a elas uma resposta dinâmica mais rápida e desempenho superior. Essas fontes possuem um sistema de controle capaz de mudar a curva característica da fonte conforme as mudanças que estejam ocorrendo no arco voltaico. Possuem ainda a vantagem de serem conectadas a equipamentos periféricos como sensores diversos, computadores e robôs, facilitando a automação de operações em condições desfavoráveis. Com o uso de fontes inversoras foi possível ainda diminuir as dimensões e a massa das fontes, isso porque nesse tipo de fonte é utilizado um transformador que eleva a frequência da corrente dos 60Hz da rede para mais de 5000Hz podendo dessa forma obter maior eficiência com menor tamanho.

2.1.6. Gás de proteção

O requisito básico para atuar como gás de proteção é ser um gás inerte. Dessa forma qualquer gás com essas características poderia ser usado para proteger o material fundido, porém o argônio por possuir a qualidade de conferir estabilidade ao arco voltaico, aliada ao baixo custo despontou como gás mais utilizado. O argônio possui um peso específico 1,3 vezes maior do que o ar atmosférico assim consegue manter inerte uma parcela boa de área no entorno da poça de fusão sendo menos propício a influências externas.

O hélio também é outro gás muito utilizado, inclusive foi o primeiro gás usado no processo TIG. Sua principal vantagem é ter um potencial de ionização maior do que o argônio, o que resulta em uma tensão cerca de 1,7 vezes maior para a mesma corrente, o que torna possível obter cordões de solda com maior penetração e menor largura, sendo indicado para chapas espessas e para materiais com alta condutividade térmica. Porém, o hélio possui um peso específico 10 vezes menor do que o argônio, o que para uma vazão igual pode resultar em

problemas de falta de penetração e turbulência, ao mesmo tempo em que custa quase três vezes mais.

O hidrogênio também é utilizado como gás de proteção, na forma de adição comerciais de 5 e 15% ao argônio. O H_2 aumenta a eficiência de fusão da soldagem TIG, mas não pode ser usado em alguns aços devido à fragilização por hidrogênio.

2.1.7. Aplicações e potencialidades

As aplicações da soldagem TIG são bem amplas já que é possível produzir soldas de elevada qualidade em quase todos os metais e suas ligas (Delgado, 2000). Porém, por ser um processo que utiliza um eletrodo não consumível, a quantidade de material de adição depositado é limitada no caso de soldagem manual e esse processo perde um pouco de espaço em operações onde é necessária alta taxa de deposição. Esse fato pode ser contornado pelos crescentes estudos sobre a soldagem GTAW com alimentação automática de arame, como por exemplo, o uso da caneta TIG.

Para a soldagem de tubulações, normalmente o TIG é utilizado para realizar o passo de raiz com adição de material, sendo que o restante do cordão de solda é preenchido com outros processos, como eletrodo revestido e MIG/MAG por exemplo. É frequentemente utilizado em aço carbono, aço inoxidável, ligas de cobalto e aços de alta e baixa liga. Em materiais refratários e reagentes, como titânio, zircônio e nióbio o TIG também vem sendo aplicado mediante as suas características de alta qualidade da união e capacidade de proteção gasosa contra contaminação.

Uma vantagem desse processo é a produção de soldas limpas mesmo com a adição de material. Isso porque o TIG é isento de respingos como acontece no curto-circuito da soldagem GMAW e também não há a formação de escória devido ao material celulósico do SMAW ou do fluxo de proteção do FCAW ou SAW. Outra aplicação bem difundida é a soldagem de tubos pela técnica orbital tanto de forma autógena, sem adição de material, quanto com alimentação automática de arame.

Na modalidade para a soldagem de tubos, o eletrodo de tungstênio é fixado em um cabeçote orbital que rotaciona ao longo de todo o perímetro de solda. Podem ser utilizados basicamente dois tipos de cabeçotes. Os cabeçotes de câmara fechada tem capacidade para soldar tubos de até 170 mm de diâmetro e 4 mm de espessura, sem adição de material, onde essa câmara é preenchida com gás inerte para a proteção da poça de fusão. Os de câmara aberta já são mais

indicados para tubos com espessura superior a 3,5 mm onde já começa a se fazer necessário a alimentação automática de arames.

2.2. Processo plasma

2.2.1. Histórico

A origem do processo plasma parte do desenvolvimento do sistema de vórtice de Schoenherr, em 1909. Esse alemão ao injetar tangencialmente um gás num tubo com eletrodos de carbono conseguiu estabilizar e restringir o arco voltaico dentro do tubo, mas o princípio da constrição do arco começou a ser utilizado como meio para o trabalho com metais apenas durante a década de 1950. A primeira tocha plasma foi construída pelo pesquisador da Union Carbide Corporation, Robert MacCornack Gage, em 1953. Com essa nova tocha era possível verificar um aumento da concentração de energia do arco da mesma forma que permitiu o trabalho com comprimentos de arco maiores. Essas vantagens devido a tocha forçar a passagem de um arco TIG por um orifício de diâmetro pequeno. Inicialmente essa energia concentrada em um pequeno ponto foi utilizada para o corte de metais e posteriormente se estendeu para a soldagem.

As primeiras máquinas para a soldagem e revestimento por plasma datam de 1961 sendo que os Estados Unidos na montagem do foguete TITAN III-C já utilizaram o plasma. Já em 1978, a NASA substituiu o processo TIG pelo plasma na soldagem dos tanques de alumínio das aeronaves espaciais. A aplicação do processo plasma esteve, desde sua descoberta, ligada a indústria de alta tecnologia fazendo com que o processo não fosse amplamente difundido por todos os setores de fabricação. Uma das razões para isso certamente foi o alto preço de aquisição do equipamento principalmente quando comparado com o processo TIG, além da necessidade de mão de obra mais qualificada para sua operação e modificação de variáveis. Outra razão pode ter sido o fato de apresentar o plasma como um processo totalmente novo, e não como uma evolução do TIG, o que criou certa desconfiança pelos responsáveis do setor, de forma que a soldagem por plasma é considerado um processo recente e ainda não estudado de maneira suficiente para extrair todas as suas potencialidades.

2.2.2. Princípios de funcionamento

Dito como uma variação do TIG, o processo PAW (Plasma Arc Welding) se assemelha ao antecessor e apresenta algumas diferenças essenciais para seu funcionamento. A semelhança está

no fato de usar um eletrodo não consumível, geralmente de tungstênio, para estabelecer um arco elétrico com a peça ao mesmo tempo em que protege o material em fusão por fluxo de gás inerte através do bocal. A principal diferença está na forma do chamado bico de contato. A tocha plasma apresenta uma câmara onde está localizado o eletrodo e onde é estabelecido primeiramente um arco elétrico entre o eletrodo e o bico de contato, chamado de arco não transferido. Quando a soldagem é iniciada o arco é estabelecido entre o eletrodo e a peça de trabalho sendo que o gás ionizado, formando o plasma, é forçado a passar por um orifício no bico de contato que possui um diâmetro relativamente menor do que a câmara anterior. Esse processo faz com que o jato de plasma seja acelerado e fique concentrado em uma área pequena, o que faz a densidade de energia ser elevada. Diz-se então que o arco voltaico no processo plasma é um arco colimado devido ao fato descrito acima. Como esse arco colimado, concentrado em um ponto e a alta velocidade, não permite a proteção do material fundido é necessário outro gás para realizar essa tarefa.

Portanto, no processo plasma são necessários no mínimo dois suprimentos de gás inerte, um para o gás de plasma e outro para o gás de proteção. O gás de plasma é aquele que flui pelo bico de contato sendo ionizado e acelerado sendo um dos responsáveis pela a energia da soldagem. Valores típicos para o gás de plasma estão entre 0,2 e 2,5 l/min. O gás de proteção, de forma similar ao TIG, é usado para evitar a oxidação e contaminação pelo ar atmosférico e é alimentado pelo bocal concentricamente ao bico de contato.

Ao contrario de seu processo de origem que possui uma configuração básica com praticamente a distância eletrodo-peça como variável, na soldagem plasma essas variáveis aumentam. Tem-se a distância bico de contato-peça (DBCP) que tem influência sobre a penetração e a largura do cordão de solda, de forma similar ao TIG, mas de maneira mais suave devido a concentração do arco. O recuo do eletrodo (Re) é a distância entre a ponta do mesmo e a face externa do bico de contato. Segundo Oliveira 2001, esse parâmetro atua sobre o grau de constrição do arco, influenciando, portanto em sua rigidez (capacidade de não sobre desvios de ordem magnética) e também na penetração da solda. O diâmetro do orifício constritor, de forma conjunta ao recuo do eletrodo, modifica a rigidez do arco, penetração da solda e a zona termicamente afetada (ZTA).

Para que se trabalhe com o plasma é necessário no mínimo:

- uma tocha específica (bico de contato, diâmetro do orifício, bocal).

- eletrodo não consumível.
- fonte de energia (para os arcos não transferido e transferido).
- gás de plasma
- gás de proteção
- sistema de refrigeração

Uma bancada de soldagem Plasma é mostrada abaixo junto com o detalhe da tocha em corte na Figura 2.

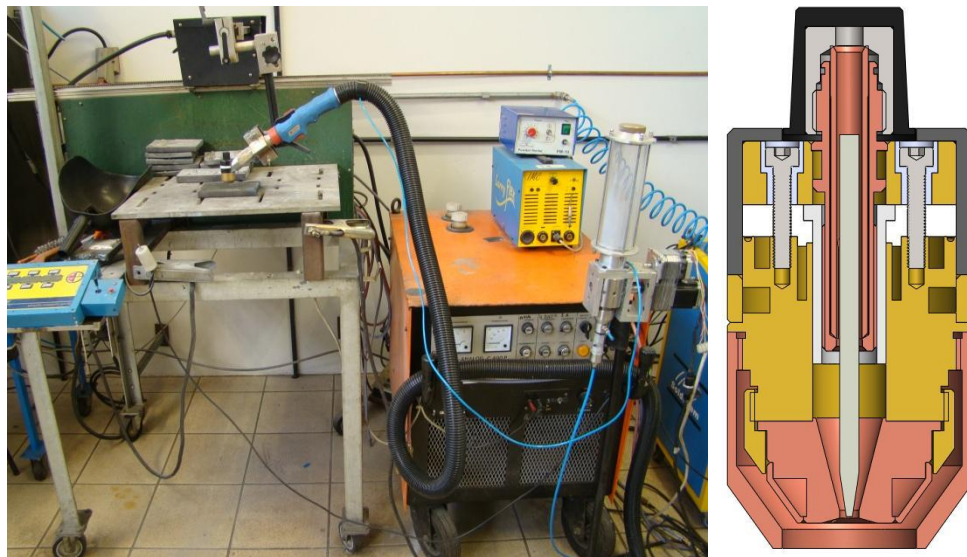


Figura 2 – Bancada de trabalho Plasma com adição de pó e detalhe da tocha de soldagem.

2.2.3. Tochas

Uma tocha plasma possui uma maior complexidade tecnológica e consequente maior custo de aquisição devido às exigências do processo. Como, geralmente, a eficiência do processo é de 50%, ou seja, metade do calor gerado é transferido para tocha e para o ambiente, são necessários meios para a passagem de fluido refrigerante, majoritariamente água, além dos gases de plasma e de proteção. Já que a água deve chegar até o bico de contato e a tocha é fabricada com peças intercambiáveis, é preciso o uso de anéis de vedação de tamanhos variados para garantir um bom funcionamento do sistema, embora haja tochas sem os referidos anéis. Essas características de tipos de bicos de contato, bocais e circuitos de refrigeração são muito importantes tanto que tem sido objeto de estudo e de registro de patentes quando uma nova forma de construí-los traz vantagens para alguma aplicação específica.

Podemos citar ainda como outras partes constituintes, a pinça e o parafuso de aperto, responsáveis por fixar o eletrodo. É usado ainda um isolante de formato cilíndrico, feito de cerâmica ou polímero, por onde o eletrodo passa internamente e o contato com o restante da tocha externamente, isso devido ao fato de que a tocha possui uma seção negativa (eletrodo e matérias em contato) e outra seção positiva (bico de contato e materiais adjuntos) de forma a permitir o estabelecimento do arco não transferido.

Tochas manuais estão disponíveis comercialmente para correntes de até 250A e para facilitar a operação de soldagem elas são fabricadas com uma inclinação do bocal em relação ao cabo segurado pelo operador. Já as tochas para a soldagem automatizada possuem o bocal paralelo ao suporte onde a tocha é fixada ao dispositivo de deslocamento, as correntes possíveis para a operação robótica é de até 500A.

2.2.4. O arco piloto

Arco piloto é um tipo de arco não transferido estabelecido entre o eletrodo e o bico de contato. O arco piloto é utilizado em soldagem apenas como um meio necessário para promover o início do arco principal, tanto que ele pode ser apagado após o início do arco transferido. Outros tipos de arco não transferido, que se caracterizam pelo menor nível de energia, tem aplicação em corte e união de materiais não condutores e outros processos de baixa energia. Deve-se ressaltar que um fluxo insuficiente de gás plasma da mesma forma que uma corrente de arco piloto elevada aliada a uma geometria inadequada do bico de contato pode causar danos a esse último.

Como na soldagem plasma o eletrodo fica confinado em uma câmara dentro da tocha o acesso a ele é limitado, o que torna o acendimento do arco piloto por contato algo difícil e sujeito a contaminações. Mediante a isso a forma mais comum para ligar o arco piloto é através da alta frequência, valores altos de tensão no circuito eletrodo-bico de contato por um curto período. Depois de estabelecido o arco piloto, por uma fonte específica chamada de módulo plasma que pode ser um equipamento extra ou estar interno as fontes mais modernas, é formado o plasma ionizado o que auxilia na abertura do arco principal. Para o começo da soldagem o eletrodo e a peça são sujeitos a uma tensão em vazio, isso aliado com a presença do arco piloto e do início do fluxo do gás de proteção cria meios para o arco transferido. Na Figura 3 é ilustrada a diferença

básica entre arco não transferido e transferido enfatizando a localização de cada polo nos diferentes modos.

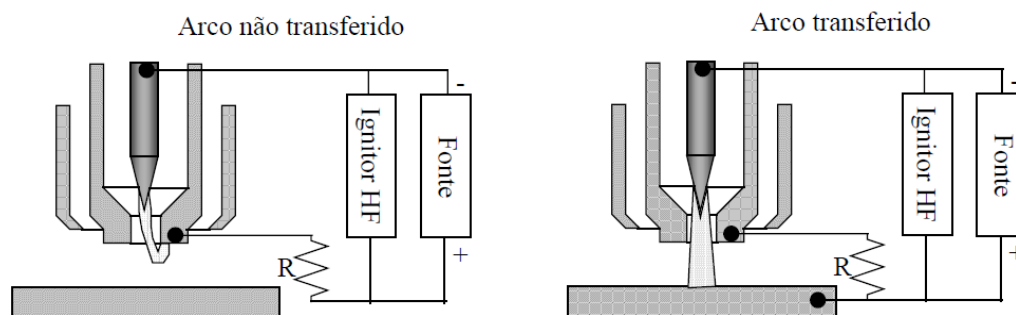


Figura 3 – Tipos de arco na soldagem plasma (Richetti, 2003).

2.2.5. Gases do processo

Os gases do processo plasma são basicamente os mesmos do TIG. Para o gás de plasma existe a preocupação em mantê-lo em níveis adequados, uma vez que vazões baixas podem trazer problemas, como o estabelecimento de um arco entre o eletrodo, o bico de contato e a peça ao mesmo tempo, conhecido como arco duplo, e vazões altas demais podem resultar em perturbações durante a fusão. O argônio é o mais usado devido ao baixo potencial de ionização, que garante facilidade para acendimento do arco piloto, e a maior densidade que contribui mecanicamente para elevar a penetração.

O hidrogênio é adicionado ao argônio em no máximo 15% pelo fato de ser um gás altamente combustível. As vantagens conseguidas com o uso desse gás estão na formação de uma atmosfera redutora que limpa a peça e causa concentração do plasma. Temos ainda a sua maior condutividade térmica, que permite reduzir a área de atuação do arco, aumentando a densidade de energia, e torna o arco mais quente e eficiente tendo com consequência o aumento da fusão ou aumento da velocidade, de acordo com o objetivo. Como desvantagens tem-se a dificuldade da abertura do arco piloto por necessitar de maior energia para isso e a limitação em trabalhar com alguns materiais como os aços de maior teor de carbono e alumínio, mediante a ocorrência de trincas e porosidades, respectivamente.

O hélio possui efeito semelhante ao hidrogênio. Sua principal característica é a alta condutividade térmica como também o maior potencial de ionização entre os gases usados em

soldagem. Com vantagens tem-se o aquecimento mais efetivo do material de base e a formação de poças de fusão maiores, porém a abertura do arco piloto fica bem prejudicada.

2.2.6. Modos de operação

O uso do plasma como fonte de energia para o setor de fabricação é bastante variado tanto que ele pode ser usado para a soldagem, desde chapas extremamente finas até grandes espessuras, e para o corte. A escolha do modo de operação em soldagem está diretamente ligada ao material de base e a espessura de trabalho, sendo que em algumas espessuras é possível operar em dois diferentes modos.

A técnica que utiliza correntes essencialmente baixas, de 0,1 a 25A, é conhecida como microplasma. Esse modo vem sendo utilizado pela instabilidade que o processo tipo apresenta em correntes abaixo de 20A, com variações do arco (falta de rigidez) e extinção do mesmo. Para a soldagem microplasma são necessários fontes de energia e tochas dedicadas a esse processo, que permitam o controle das variáveis e a formação de um arco voltaico de diâmetro muito pequeno. Geralmente a soldagem é realizada de forma autógena, ou seja, apenas o material em fusão é responsável pela união não havendo o uso de material de adição. Quando a corrente de trabalho é menor do que 10A é recomendado o uso do arco piloto para facilitar o estabelecimento do arco principal. Devido aos baixos níveis de energia as aplicações vão desde fios e chapas tão finas quanto 0,1mm até a fabricação de instrumentos cirúrgicos e equipamentos eletrônicos.

Em uma escala crescente de corrente temos o modo melt-in, ou modo convencional, na faixa de 15 a 200A. É o modo de soldagem plasma que mais se assemelha ao processo TIG, onde o calor do arco é a fonte para a fusão do material sem alcançar grande penetração. É utilizado para espessuras de até 3,2 mm e vazão de gás de plasma é relativamente baixa.

Em espessuras típicas de 3 a 10 mm a combinação de corrente do arco, vazão do gás de plasma e velocidade de soldagem dá origem a uma poça de fusão pequena que atravessa o material de base. Esse modo é chamado de keyhole ou buraco de fechadura. O arco ao incidir sobre a peça desloca o material fundido para as extremidades da poça líquida e ao retirar o material cria condições de avançar na direção da espessura até atravessar toda a extensão da peça. Posteriormente com o deslocamento da tocha esse furo é mantido a frente da poça entanto o material retirado é solidificado na parte posterior. Essa condição é garantida por um balanço muito sensível entre a tensão superficial do metal fundido e a velocidade de gás de plasma

(Paula Jr, 1997). Como efeito adicional tem-se a expulsão dos gases do jato plasma antes da solidificação da mesma forma que a movimentação do metal fundido ajuda a expelir impurezas do material, o que evita porosidades e o aparecimento de inclusões, respectivamente (Richetti, 2003). Essa técnica por disponibilizar uma alta densidade de energia, faz a condição de soldagem estar muito próxima a de corte do material. No corte, uma das mudanças é que a vazão de gás de plasma é superior fazendo com que essa velocidade expulse da peça o material fundido.

Na soldagem keyhole e plasma com adição de pó (PTA-P) as tochas mais recentes trazem de forma adicional furos auxiliares que causam uma maior concentração do arco e influenciam na qualidade do revestimento, respectivamente. Um exemplo de bico de contato com os furos auxiliares para a soldagem plasma keyhole é mostrado na Figura 4. Já a influência da posição dos furos auxiliares para adição de pó na geometria do cordão de solda foi estudada por (Díaz, 2005). Em seu trabalho o autor mostra que a posição de adição de pó a poça de fusão tem importância para a qualidade do revestimento e diluição do pó no material de base. Na figura 5 são mostrados os resultados dos ensaios realizados por (Díaz, 2005) comparando com outro resultado com adição de pó apenas na parte posterior.



Figura 4 – Bico de contato plasma com furos auxiliares.

No trabalho de (Díaz, 2005) foi realizada dois cordões de solda com as mesmas características apenas modificando a posição dos dois furos de adição de pó transversalmente e longitudinalmente à direção de soldagem. No trabalho de (Mekideche, 1989) a adição do pó se dava por apenas um orifício na parte posterior da poça de fusão. Como observado, o cordão com adição de pó transversal apresenta baixa penetração e menor largura, isso segundo o autor, devido ao resfriamento lateral da poça líquida o que diminuía a sua diluição. Já o cordão com adição de pó longitudinalmente apresentou maior penetração nas extremidades, o que seria resultado de um

resfriamento do centro da poça pela forma de adição. O efeito de um único furo de adição de pó é semelhante aos dois furos longitudinais, porém com penetração ligeiramente maior.

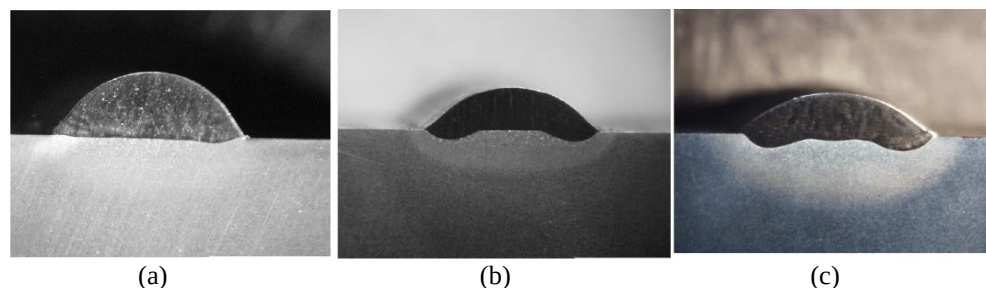


Figura 5 – Geometria dos cordões de solda com adição de pó (a) dupla transversal, (b) dupla longitudinal e (c) única posterior. Adaptado de Díaz, 2005.

Para o corte por plasma a vazão do gás para ionização é bem maior do que para a soldagem. O gás mais utilizado é o ar comprimido por ser o mais barato. O ar comprimido pode ser usado como gás de plasma para o corte uma vez que o eletrodo é de cobre com um pequeno inserto de rânio que emite os elétrons e é mais resistente a oxidação, além de ser usados como objetivos diferentes. No corte esse gás tem a função de gerar o plasma e de refrigerar os consumíveis da tocha como o eletrodo e o bocal. De forma simplificada o corte ocorre da seguinte forma: um sinal de início é transmitido à fonte de energia, a fonte então eleva a tensão em vazio entre o eletrodo e o bocal e libera o fluxo de gás plasma, o arco piloto é ativado (pode ser por alta frequência ou por toque com sistema de mola ativado pelo ar comprimido), a tocha é aproximada da peça, e o arco piloto ao ter contato com a mesma cria condições para o arco principal que funde o material ao mesmo tempo em que o jato de gás expelle esse material líquido.

2.2.7. A constrição do arco como vantagem sobre o TIG

Quando se faz qualquer comparação entre os processos TIG e Plasma, cita-se que o segundo apresenta mais vantagens devido ao fenômeno de constrição do arco. A constrição do arco se dá pelo seu confinamento e passagem por um orifício de pequeno diâmetro que causa o aumento da velocidade do jato de plasma o que segundo a maioria das referências proporciona maior estabilidade direcional. Esse fenômeno seria responsável por garantir a área transversal do arco constante ao longo da distância entre o bico e a peça, o que tornaria o processo Plasma

menos sensível a variação da referida distância, além de resultar em cordões de solda estreitos e com grande penetração.

Outro fato amplamente divulgado é a relação entre o recuo do eletrodo e do diâmetro do orifício com solda resultante, onde um alto recuo aliado a um pequeno diâmetro teria como resultado soldas com alta penetração e largura reduzida. Da mesma forma um recuo pequeno junto com um diâmetro de constrição grande diminuiria a penetração no material de base e aumentaria a largura da união (Díaz, 1999). Cada tocha tem especificado os valores máximos e mínimos para o recuo do eletrodo, o valor máximo está relacionado com a profundidade do orifício constritor, ou seja, a região cilíndrica do mesmo, e o valor mínimo com o efeito de constrição sendo que recuos menores tornam o processo Plasma semelhante a um TIG. Uma representação desses valores em uma tocha são mostrados na Figura 6.

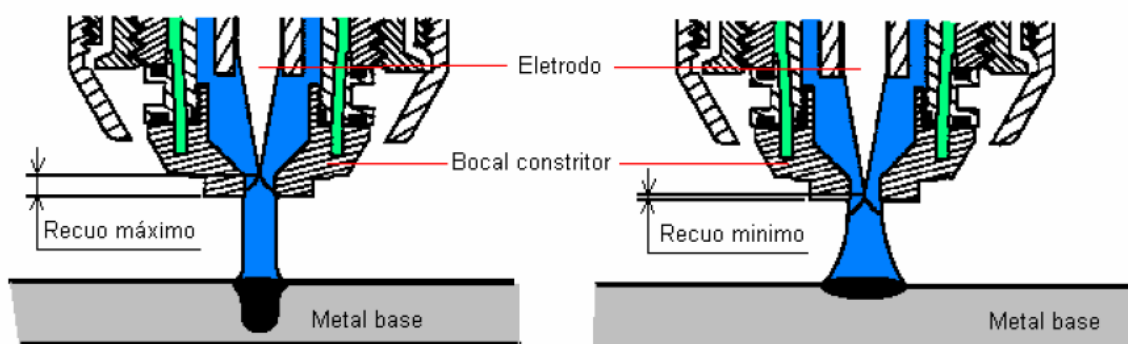


Figura 6 – A constrição do arco e o recuo do eletrodo.

O trabalho de (Richetti, 2003), com a soldagem plasma keyhole, verificou um aumento de 2V na tensão do arco quando o recuo do eletrodo era aumentado de 1,7 para 2,4 mm, como pode ser visto na Figura 7. Esse fato é explicado pelo aumento da coluna do arco bem como de sua temperatura. O mesmo trabalho ainda evidência que as mudanças no perfil da solda não foram significativas apenas com uma leve alteração na penetração da solda, sendo que o aumento no reforço da raiz foi de 0,13 mm.

Já em (Reis e Scotti, 2007) é evidenciado que a concentração do arco plasma dá origem a um arco colunar com maior temperatura e energia. Um exemplo é dado para evidenciar uma distribuição de temperatura maior no processo TIG quando se aumenta a distância entre a tocha e a peça. Mas o que pode ser observado é que as distâncias do eletrodo à peça são diferentes e o aspecto extremamente cilíndrico do arco plasma. Essa característica do arco plasma de ser

completamente cilíndrico foi estudada por Schnick et all em 2009, que por meio de simulação da velocidade do jato plasma evidenciou o formado de sino, como pode ser visto na Figura 8. Nessa mesma figura podemos ver que a transição entre a câmara de confinamento do gás de plasma e a região de constrição é feita por um ângulo reto, o que segundo alguns autores pode gerar turbulência que prejudique a formação de um jato de plasma estável.

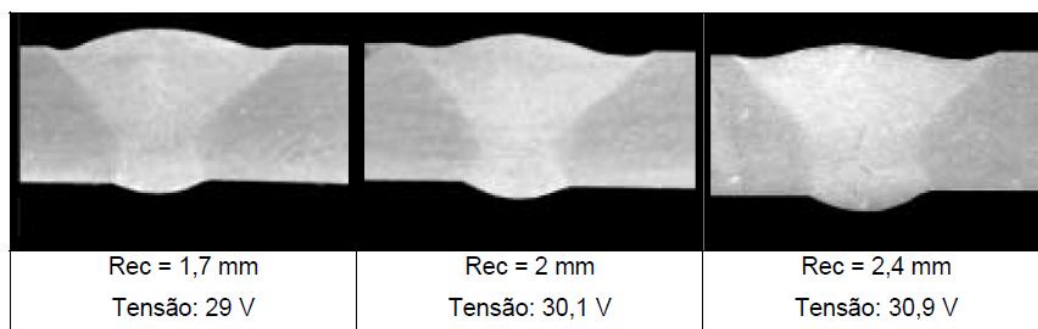


Figura 7 – Aumento da tensão do arco devido ao recuo do eletrodo

O mesmo trabalho de Schnick et all, ao analisar a influência do formato da tocha sobre a temperatura do arco e pressão do jato de plasma, confirma que esse formato tem grande responsabilidade pelas características do jato de plasma e pela geometria da união, de modo especial o diâmetro do orifício constritor é citado. Por outro lado, o ângulo interno do bico constritor até a seção cilíndrica do mesmo teria menos influência.

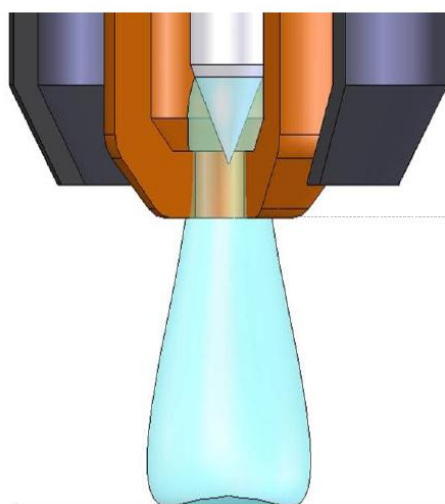


Figura 8 – Aspecto de sino do arco plasma confirmado por simulação feita por Schnick et all.

Ainda no trabalho citado acima, após simulação de viscosidade e de temperatura e medição da pressão arco, o autor ao variar a distância tocha peça confirmou, como pode ser visto na Figura 9, que ao aumentarmos a corrente aumenta-se a pressão de impacto do jato plasma na peça. O fato novo trazido por essa mesma figura é de que se aumentarmos a distância entre a tocha e a peça a pressão diminui, porém nota-se uma inversão entre 2 e 4 mm, ou seja, para esses dois valores um aumento dessa distância aumenta a pressão. A explicação dada é de que no nível de temperatura que o arco se encontra, cerca de 10000 K, o argônio utilizado como gás de plasma está a uma alta viscosidade, característica que não muda quando a tocha é afastada de 2 para 4 mm, o que segundo o trabalho seria a explicação do aumento da pressão com o aumento da distância.

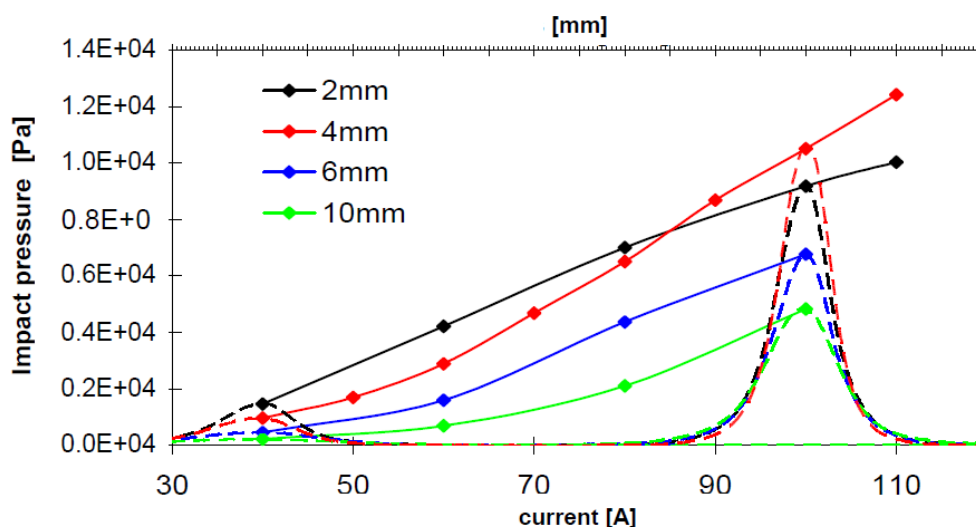


Figura 9 – Influência da corrente e da distância tocha peça sobre a pressão de impacto do jato plasma sobre a peça.

Como efeito direto da variação da pressão sobre a superfície da peça temos também uma variação da penetração do cordão de solda. Concordando com o gráfico da figura anterior, na Figura 10 são mostradas a macrografia de três soldas realizadas variando-se apenas a distância tocha peça. A maior pressão medida no arco afastada 4 mm da peça teve também uma maior profundidade do material fundido. Podemos notar na mesma figura que a largura da solda também teve o mesmo comportamento, sendo que para a maior distância obteve-se a menor largura. Esse resultado vai de encontro a muitos autores que dizem que sempre que se afasta a tocha da peça por haver divergência do arco a largura da solda aumenta.

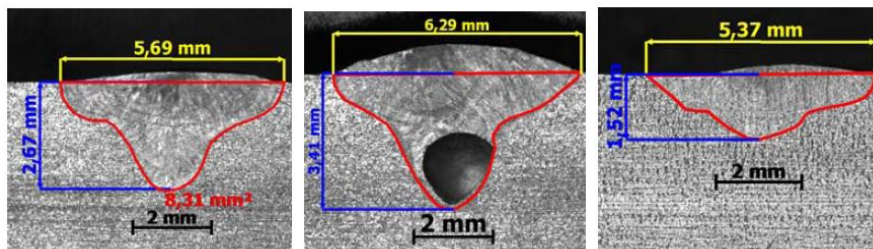


Figura 10 – Variação da geometria da solda para as distâncias tocha-peça de 2, 4 e 6 mm da esquerda para a direita.

Todos esses desencontros de informações e muitas vezes a falta de outras que realmente possam caracterizar os parâmetros de comparações, tornam a certeza da superioridade de um processo mediante o outro no mínimo duvidoso. Não bastasse isso, outros autores apenas reproduzem dados antigos de livros consagrados, como o da AWS. Uma das ilustrações mais divulgadas é a que exemplifica a maior temperatura do arco plasma, bem como para a mesma distância do eletrodo até a peça uma tensão duas vezes maior para o arco constrito para o mesmo valor de corrente, como reproduzido na Figura 11.

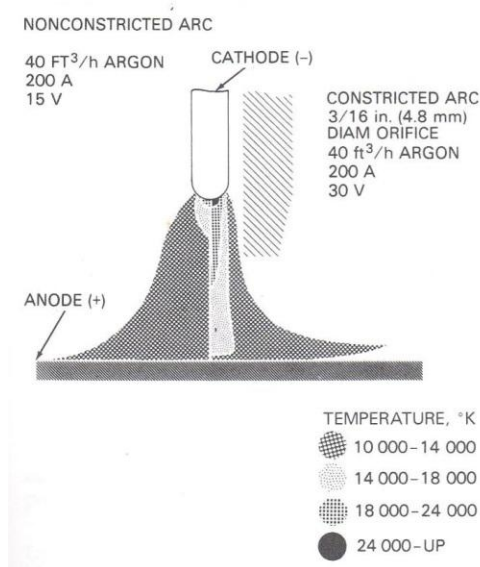


Figura 11 – Comparação entre as temperaturas do arco GTAW e PAW, com detalhe para o dobro da tensão para o arco constrito (AWS).

Dentre as comparações mais realizadas entre os processos GTAW e PAW estão as de temperatura do arco e potência (através do valor da tensão). Em algumas literaturas as distâncias do eletrodo até a peça são diferentes o que por consequência direta faz a tensão do arco plasma

seja maior, o que não prova realmente que sobre as mesmas condições o arco plasma tem maior energia. Em outras fontes é apenas citado que as condições são iguais, mas as mesmas não são apresentadas, apenas a vantagem da utilização do processo plasma é destacada.

Em (Reis e Scotti, 2007) é realizada uma comparação clássica entre os arcos plasma e TIG, a qual é reproduzida na Figura 12. A ilustração evidencia a concentração do arco e a maior temperatura do mesmo, tanto na região próxima ao eletrodo quanto na superfície do metal. A diferença de tensão é dada como resultado da constrição do arco, assim um arco de sofra constrição de seu perfil necessita de uma maior tensão para conduzir a mesma corrente.

Outro fato abordado são os efeitos mecânicos mais pronunciados no processo Plasma. A pressão para um arco constrito pode chegar a ser 10 vezes maior do que um arco não constrito equivalente. E como exemplo, para uma corrente de 100 A, a pressão de um arco TIG é de cerca de 0,67 MPa enquanto para o Plasma ela chega à 6,9 MPa.

Em relação a concentração do arco, a redução de área da consequente constrição do jato plasma faz a densidade de energia aumentar até 3 vezes. Já a divergência do arco constrito é de cerca de 6° enquanto de um arco TIG é de até 45°, mas essa informação é discordante com um exemplo apresentado no mesmo trabalho. No exemplo para uma mesma corrente e mesma distância entre eletrodo e peça, o arco TIG se expande até 10 mm de seu centro ao mesmo tempo em que o arco Plasma diverge até 7,5 mm. Se a informação sobre a divergência dos arco estivesse correta, para uma distância entre eletrodo e peça de 8 mm, teríamos para o arco TIG uma expansão de 3,3 mm e de apenas 0,3 mm para o arco Plasma.

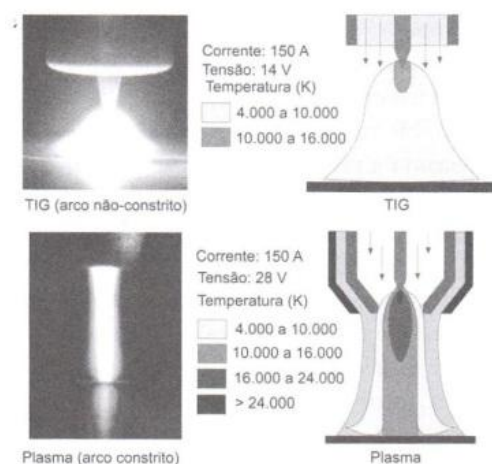


Figura 12 – Comparação de temperatura do arco feita por Reis e Scotti, 2007.

2.2.8. Aplicações e potencialidades

A possível concorrência direta do processo Plasma com os outros processos convencionais, como TIG e MIG/MAG, está justamente nas melhorias proporcionadas pela constrição do arco. Assim, para uma mesma aplicação, onde seria necessário fazer o uso de material de adição nos dois processos citados anteriormente, com o devido ajuste de parâmetros é possível fazer uma união autógena (sem material de adição). Esse simples fato traz consigo a vantagem de menor necessidade de logística e redução o custo do processo. Ainda, por permitir uma menor área de incidência do arco a ZTA é menor o que acarreta em menores distorções da peça e menor tensão residual.

Com a energia do arco mais concentrada podem ser usadas maiores velocidades de soldagem, o que aumenta a produtividade. O arco colimado também se torna mais rígido o que diminui a sua perturbação por campos magnéticos adjacentes e permite que haja pequenas variações da distância entre eletrodo e peça durante a soldagem sem perdas significativas no que diz respeito a qualidade e geometria da união.

As características do processo Plasma vem sendo usadas a mais de meio século para o corte de metais, mas a sua aplicação para a soldagem é considerada recente e não totalmente desenvolvida. As principais aplicações atuais estão em áreas específicas de processos com alto valor agregado ou com grande volume de produção, como exemplo podemos citar as indústrias aeronática e automobilística. Outros trabalhos mais recentes apontam o uso da soldagem Plasma subaquática molhada com aumento da ductibilidade da junta e o revestimento de pás de turbinas e paredes de caldeiras pelo processo Plasma com adição de pó.

O PAW vem sendo utilizado já a alguns anos no reparo e fabricação de tubos de aço carbono, aço inoxidável e ligas de cobre utilizando correntes pulsadas. Na indústria do petróleo, aplicações off-shore em tubos de aço inoxidável duplex com espessuras de até 10,6 mm, tem reduzido o tempo de soldagem em até 50% quando comparado com o TIG. Na soldagem de ligas de alumínio também foi possível melhorar as características da solda e aumentar a produtividade da soldagem de componentes de motores à jato das aeronaves comerciais e dos tanques externos de combustível de ônibus espaciais.

Enquanto muitas operações de soldagem Plasma utilizam primordialmente as vantagens de concentração do arco e consequente maior penetração ou maior velocidade de deslocamento da tocha, esse processo mais recentemente vem sendo usado com ótimos resultados para o

revestimento através da fusão de material de adição em forma de pó. Nas indústrias de geração de energia elétrica um dos motivos de parada para manutenção é devido ao fenômeno de cavitação nas pás das turbinas. Silva 2010, elaborou um extenso trabalho sobre estabelecimento de parâmetros, equipamentos e características do processo ao qual chamou de PTA-P (Plasma de Arco Transferido com Alimentado com Pó).

As modificações do PAW para a soldagem com adição de pó permitem que se tenha uma alta taxa de fusão desse material ao mesmo tempo resultando em uma baixa diluição, já que se trata de uma operação de revestimento não desejando portanto penetração. Como forma ilustrativa é mostrado na Tabela 2 a diluição média de alguns processos de soldagem e suas respectivas formas de adição de material. Enquanto em outros processos de revestimento uma

Forma do material de adição	Processo de soldagem	Diluição média
Vareta	TIG	20%
Eletrodo Revestido	ER	25%
Pó	PTA-P	3%

Tabela 2 – Comparação da diluição média de diferentes processos reproduzida de Silva, 2010.

maior taxa de deposição implica em maior energia necessária e consequente maior diluição, no PTA-P se tem uma maior independência entre a energia disponibilizada pelo arco e o material adicionado em forma de pó. Sobre o custo do processo existe divergências, já que alguns citam o menor custo em geral do pó em relação a varetas e arames, outros informam que em geral os arames são mais baratos e que possuem maior variedade de ligas e misturas de diferentes composições. Porém, o trabalho com pó permitiu que o próprio usuário possa misturar diferentes materiais de acordo a aplicação, mesmo com a dificuldade de encontrar certas ligas e a inexistência de fornecedores nacionais.

3. Metodologia

Para a análise a que se propõe esse trabalho serão realizados cordões de solda sobre chapa de forma automática. A movimentação da tocha será dada pelo uso do Tártilope V2, um manipulador robótico que possui dois graus de liberdade. As soldas serão realizadas em chapas de aço comum ao carbono de 140 mm de comprimento, 101,6 mm de largura e 12,7 mm de espessura. As soldas terão 100 mm de comprimento e para a medição da geometria pelo uso de macrografias será feito o corte no ponto médio. Para cada mudança de distância entre a tocha e a chapa serão realizadas três cordões de solda para que se possa dar maior confiabilidade aos resultados, trabalhando assim com os valores médios.

Para a medição de corrente e tensão do arco será utilizado o Sistema de Aquisição Portátil (SAP), que permite realizar aquisição desses dados e calcular os valores médios ao longo de todo o cordão de solda. Já para as medições de largura e penetração da solda, após a realização das macrografias e o devido ataque utilizando Nital 2%, será usado o software dedicado Imagetool que após ser dada uma dimensão de referência permite medir outras dimensões na fotografia da seção transversal.

Alguns parâmetros permaneceram fixos para todos os ensaios com as tochas Plasma como é mostrado na Tabela 3. Para a soldagem TIG a vazão de gás de proteção foi de 12 l/min, a velocidade de soldagem 5 cm/min e a corrente igual a 100 A.

Parâmetro	Valor ou tipo
Corrente de soldagem	100 A
Corrente de arco piloto	20 A
Velocidade de soldagem	5 cm/min
Recuo do eletrodo	2,7 mm
Diâmetro do orifício plasma	3,2 mm
Gás de proteção	Argônio (99,9%)
Vazão do gás de proteção	12 l/min
Gás de plasma	Argônio (99,9%)
Vazão do gás de plasma	1 l/min

Tabela 3 – Parâmetros fixos para todos os ensaios com as tochas plasma.

Modelo	Binzel Aut WIG 400 W
Modo de corrente	DC (contínua) e AC (alternada)
Corrente de operação	400 A – DC 320 A - AC
Diâmetro de eletrodo	0,5 até 4,0 mm
Refrigeração	Circuito único de água

Tabela 4 – Alguns dados sobre a tocha Binzel Aut WIG 400 W.

3.2. Tocha TBi PLP 300

Segundo o fabricante entre as vantagens das tochas plasmas estão a alta densidade de energia semelhante a um sistema laser, a alta velocidade de soldagem permitida principalmente na soldagem keyhole, formação de cordões de solda com alta qualidade sendo homogêneo e sem poros, a não necessidade de retrabalho devido a ausência de respigos. Os componentes e uma visão geral da tocha TBi PLP 300 são mostrados na Figura 14.

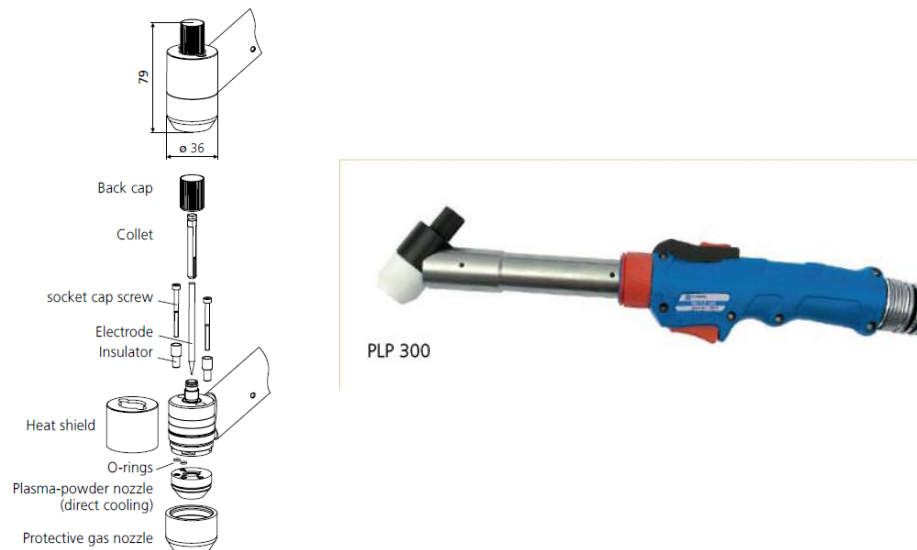


Figura 14 – Tocha TBi PLP 300.

Para o modelo de tocha utilizado as principais características apresentadas são a eficiência da refrigeração da tocha e do bocal através de um circuito duplo de circulação de água, o que permite maior vida útil de seus componentes, o formato do corpo da tocha que possibilita

alcançar locais de acesso limitado e a versatilidade de uso tanto na soldagem manual com conforto quanto na soldagem automatizada seja com a adição de arame, vareta, pó ou de forma autógena. Os principais dados da tocha TBi PLP 300 são apresentados na Tabela 5 abaixo.

Modelo	TBi PLP 300
Modo de corrente	DC (contínua) e AC (alternada)
Tensão de operação	10 – 40V
Corrente de operação	8 – 350A
Furos adicionais	Quatro igualmente espaçados concêntricos ao orifício constritor
Diâmetro de eletrodo	3,2 ou 4,0 mm
Refrigeração	Circuito duplo de água

Tabela 5 – Dados do fabricante da tocha TBi PLP 300.

3.3. Tocha Labsolda PTS 3

A tocha do Labsolda é apresentada como uma evolução das tochas existentes atualmente no mercado. Suas principais características são o circuito único de refrigeração que reduz a quantidade de acessórios e facilita a manutenção e intercambiabilidade de peças, um sistema de distribuição de gás adicional, e de pó quando o mesmo é utilizado, que torna seu fluxo mais contínuo e menos turbulento e a fixação do bico de contato por porca externa o que facilita a troca desse consumível. Os principais componentes e uma foto da tocha Labsolda PTS 3 é apresentada na Figura 15 abaixo.

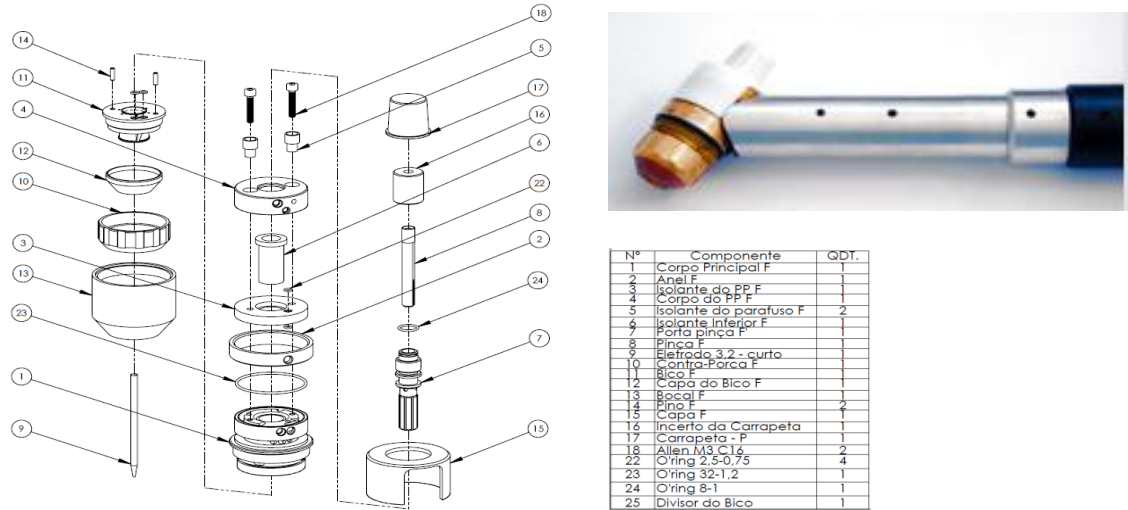


Figura 15 – Tocha Labsolda PTS-3-4.

Devido ao projeto, essa tocha permite soldar em posições diferentes da posição plana, especialmente na posição sobre cabeça, com excelente qualidade da união ou revestimento justamente por garantir uma distribuição adequada do gás de araste e do pó. Dependendo da aplicação e do modelo utilizado é possível a utilização de apenas um furo auxiliar posterior ou 4, 6 e 8 furos igualmente espaçados concêntricamente ao orifício constritor. As principais características de operação dessa tocha são mostradas na Tabela 6.

Modelo	Labsolda PTS-3-4
Modo de corrente	DC (contínua) e AC (alternada)
Tensão de operação	10 – 40V
Corrente de operação	30 – 200A
Furos adicionais	Quatro igualmente espaçados concêntricos ao orifício constritor
Diâmetro de eletrodo	3,2 ou 4,0 mm
Refrigeração	Circuito único de água

Tabela 6 – Características da tocha Labsolda PTS 3.

3.4. Tocha Plasma-Master PP-6-01

Esse modelo de tocha, segundo o fabricante, foi desenvolvido para atuar no revestimento de diversas superfícies externas pela soldagem plasma com adição de pó. Como um diferencial de projeto essa tocha possui um círculo concêntrico ao orifício constritor onde, geralmente, um fluxo adicional de argônio é empregado para ocasionar, teoricamente, uma maior constrição do arco. Esse fenômeno será estudado no presente trabalho. Outra característica ressaltada é a possibilidade de trabalhar com adição de pós a base de ligas de ferro, níquel e cobalto que protegem a superfície contra o desgaste e corrosão. Uma visão geral dessa tocha e de seus componentes pode ser vista a seguir na Figura 16.

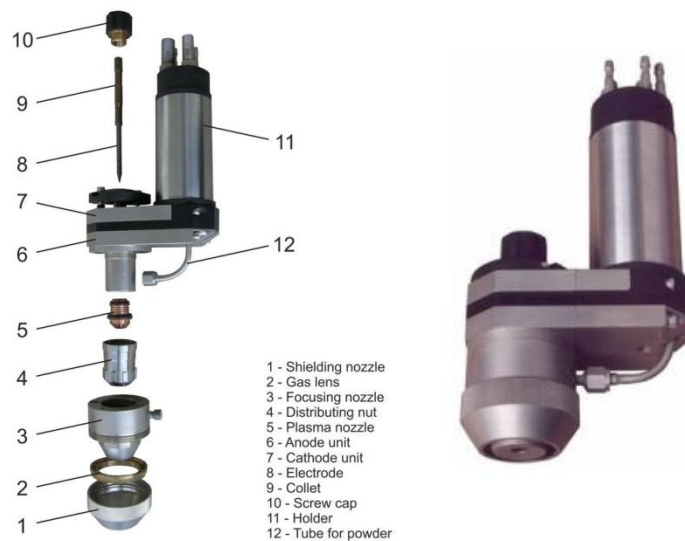


Figura 16 – Componentes e aspecto geral da tocha Plasma-Master PP-6-01.

Algumas características dessa tocha, que é fabricada na Ucrânia, estão agrupadas na Tabela 7 abaixo.

Modelo	Plasma-Master PP-6-01
Modo de corrente	DC (contínua) e AC (alternada)
Corrente de arco piloto	30 – 50A
Corrente de operação	30 – 350A
Furos adicionais	Vários formando um anel concêntrico ao orifício constritor
Diâmetro de eletrodo	4,0 mm
Refrigeração	Circuito único de água

Tabela 7 – Características da tocha Plasma-Master PP-6-01.

3.5. Tocha MIG.o.MAT PMW 350

O fabricante apresenta essa tocha como uma ótima solução para a soldagem keyhole, uma vez que a mesma possui bicos com os furos auxiliares transversalmente a direção de soldagem. Esses furos proporcionam obter um arco elíptico com alta concentração de energia resultando em um cordão com largura e zona termicamente afetada pequena e alta penetração. Os componentes e um modelo geral da tocha são vistos na Figura 17.

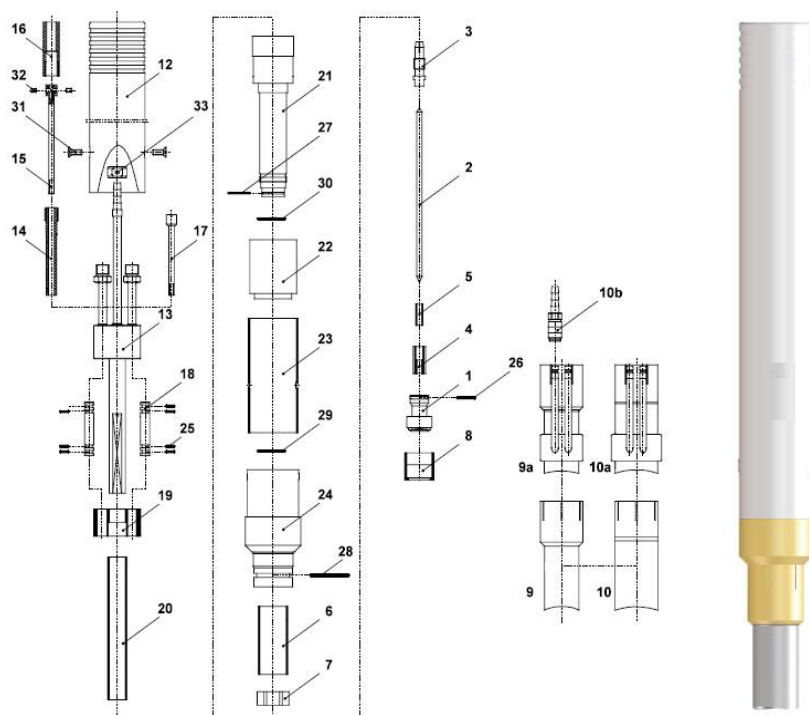


Figura 17 – Componentes e modelo da tocha PMW 350.

Apesar de ser fortemente indicada para a soldagem keyhole, essa tocha também pode ser utilizada no plasma convencional como foi o caso dos ensaios do presente trabalho. Alguns dados fornecidos pelo fabricante estão organizados na Tabela 8.

Modelo	Mig.o.Mat PMW 350
Modo de corrente	DC (contínua) e AC (alternada)
Corrente de arco piloto	10 – 30A
Corrente de operação	até 350A
Furos adicionais	Dois orifícios igualmente espaçados transversalmente à direção de soldagem
Diâmetro de eletrodo	4,0 mm
Refrigeração	Circuito único de água

Tabela 8 – Características da tocha Mig.o.Mat PMW 350

3.6. Tocha Thermal Dynamics PWM 300

Essa tocha é um exemplo típico de equipamento para a soldagem Plasma melt-in autôgeno, ou seja, sem o uso de material de adição. O fabricante fornece bicos plasma com diâmetros de 2,4 até 3,2 mm cada um podendo ser usado até um valor máximo de corrente. A tocha e seus componentes são apresentados na Figura 18.

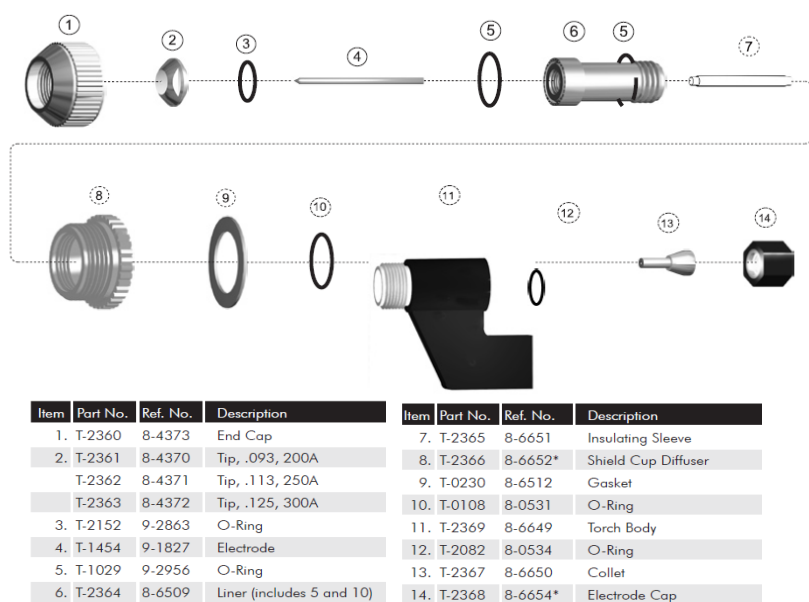


Figura 18 – Componentes e tocha PWM 300.

Algumas informações adicionais sobre a tocha Plasma em questão são mostradas na Tabela 9 abaixo.

Modelo	Thermal Dynamics PWM 300
Modo de corrente	DC (contínua)
Tensão de operação	10 – 40V
Corrente de operação	até 300A
Diâmetro de eletrodo	4,0 mm
Refrigeração	Circuito único de água

Tabela 9 – Características da tocha PWM 300.

3.7. Fonte de soldagem IMC Digiplus A7

A fonte de soldagem Digiplus A7 utilizada nos ensaios é uma evolução da linha Digitec do mesmo fabricante e como tal teve seu software e hardware readequado para suprir a demanda por tecnologia mais avançada para o trabalho com diferentes modalidades de soldagem. Trata-se

de um equipamento com projeto e tecnologia totalmente nacional, podendo ser usada em diferentes ramos da indústria brasileira assim como para a pesquisa e extensão. Abaixo, na Figura 19, é mostrada a fonte de soldagem com detalhe para o teclado de interface.



Figura 19 – Fonte de soldagem IMC Digiplus A7 e detalhe do teclado.

Por possuir um avançado processador ARM de 32 bits é possível operar com várias modalidades de soldagem com elevado desempenho no controle do arco e transferência metálica. Isso devido à capacidade de operação e de customização através de softwares o que possibilita a criação de um programa exclusivo para cada tipo de aplicação, além da facilidade de troca de informações e automatização mediante o uso de robôs, computadores e linhas de montagem. Utilizando microprocessadores outra vantagem conseguida é a capacidade de armazenar parâmetros e variáveis para operações posteriores. Os principais dados elétricos são informados na Tabela 10.

Fonte de soldagem	Digiplus A7 450
Tensão de alimentação	220/380/440 V
Tensão em vazio	50/68/85 V
Corrente a 100%	280 A
Potência nominal	10 kVA
Faixa de corrente	5 – 450 A
Fator de potência	0.94

Tabela 10 – Valores de operação da fonte de soldagem IMC Digiplus A7.

Toda a configuração da fonte de soldagem é feita através de um painel com display e teclas, onde é possível a seleção de processos e mudança de variáveis de forma simples e intuitiva. A interface homem-máquina também pode ser feita através do uso de um computador utilizando o modo controle externo, o que permite o controle a distância. As teclas de seleção são utilizadas para acessar as opções mostradas próximas a cada uma. Já as teclas de incremento são usadas para aumentar ou diminuir o ganho de uma variável.

4. Resultados

4.1. Adaptação do bocal

Para soldar utilizando a tocha TBi PLP 300 com as distâncias bico de contato até a peça de 1,3 a 4,3 mm foi necessário cortar o bocal de proteção, pois o mesmo se chocava com a chapa uma vez que seu comprimento é 5 mm maior do que o bico de contato. Na Figura 20 abaixo pode ser visto o bocal cortado à esquerda em comparação com o bocal original à direita.



Figura 20 – Bocal cortado à esquerda para possibilitar a soldagem com pequenas distâncias entre tocha e chapa.

Os ensaios começaram com bons resultados em relação à proteção gasosa resultante dessa mudança no bocal da tocha. Porém, esse corte no bocal mudou a característica do escoamento do gás de proteção, como pode ser visto na simulação mostrada na Figura 21, o que para distâncias a partir de 7 mm não era suficiente para a proteção do metal fundido. Para tentar resolver esse problema a hipótese de que o fluxo de gás de proteção estava muito turbulento e por isso estava desempenhando seu papel de forma deficiente. Assim considerando a informação disponibilizada por inúmeros fabricantes de que o gas lenz aumenta a uniformidade do escoamento do gás de proteção e na falta de um fornecedor imediato de um gas lenz para a tocha plasma em estudo uma tentativa de simular um gas lenz foi ensaiada. Uma tela de aço inoxidável de malha extremamente pequena foi brasada junto a saída do bocal de forma a direcionar o fluxo

perpendicularmente a chapa sendo soldada. O protótipo de gas lenz para a tocha TBi PLP 300 é mostrado na Figura 22.

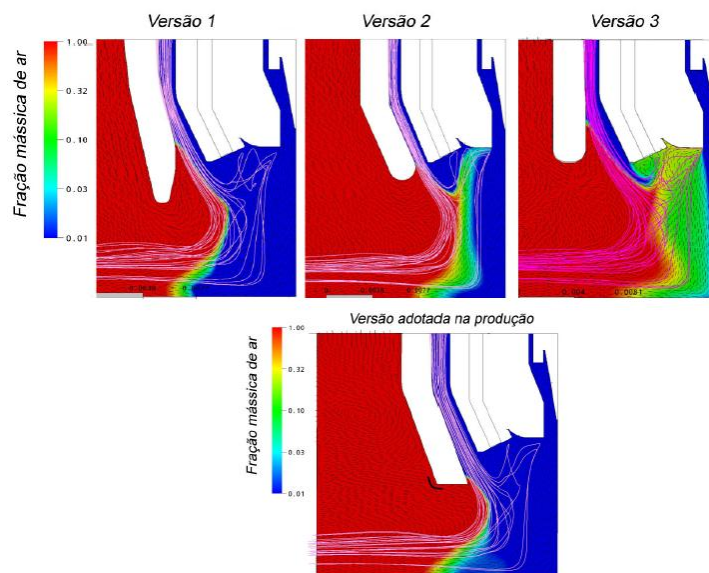


Figura 21 – Simulação dos fluxos dos gases reproduzida de (Silva, 2010)

Dessa forma, para as distâncias superiores a 7 mm o bocal original foi necessário para garantir uma solda livre de defeitos. Primeiramente essa mudança resolveu o problema, mas novamente ocorreu a formação de poros.

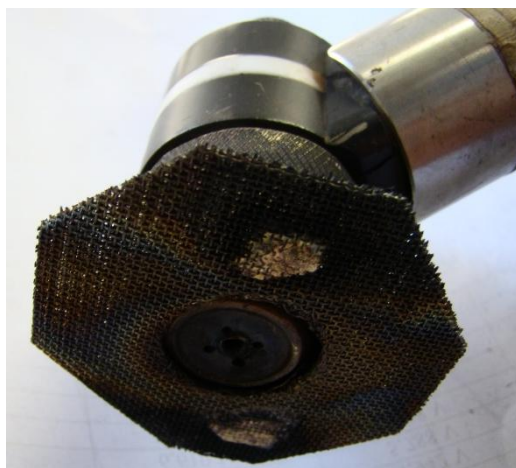


Figura 22 – Tentativa de tornar o fluxo de gás de proteção mais uniforme.

Desta vez então foi levantada a hipótese de haver alguma fonte de ar atmosférico sendo adicionada a proteção da solda, constatada as mangueiras de gás de proteção e de plasma, nenhuma irregularidade foi encontrada. A causa poderia ser rajadas de vento o que também foi descartado pelo uso de barreiras no entorno da solda. Foi então que a verdadeira fonte de ar contaminante foi verificada, a tocha utilizada possui os furos auxiliares para a adição de pó e a mangueira que supre o pó juntamente com o gás de araste estava exposta ao ar livre. Dessa forma, devido ao fluxo de gás de proteção durante a soldagem a pressão na região do cordão era ligeiramente menor do que a atmosférica, o que causava um fluxo de ar pelos furos auxiliares contaminando o metal líquido.

Por serem tochas com características semelhantes os problemas de contaminação da poça de fusão pelo ar atmosférico proveniente do canal de pó também se repetiram na tocha PTS 3 do Labsolda e foram solucionados da mesma forma.

4.2. A influência do gás auxiliar

Os ensaios prosseguiram com a tocha PP-6-01 fabricada na Ucrânia e desde a menor distância bico de contato-peça (1,3mm) houve o surgimento de poros. Imediatamente as mesmas causas das outras tochas foram analisadas e a devida solução empregada. Porém, o problema continuava mesmo com o aumento da vazão dos gases de proteção e plasma em diferentes configurações e valores. Na Figura 23 abaixo é apresentada uma foto dos cordões de solda realizados com o referido defeito. O aparecimento de poros tem como uma de suas causas uma proteção deficiente do metal em fusão e como a proteção do gás específico para essa função não estava sendo suficiente era necessário adicionar outro gás.



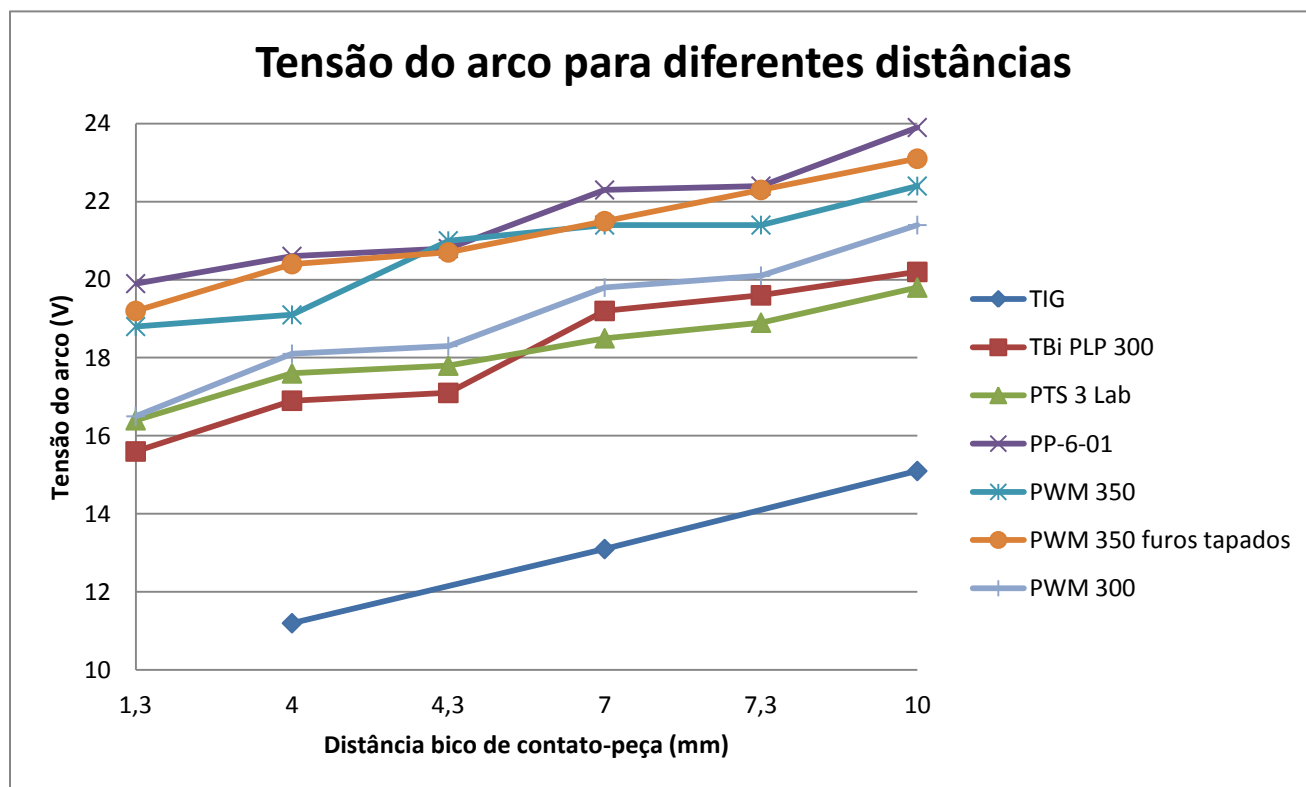
Figura 23 – Cordões de solda com formação de poros realizados com a tocha PP-6-01.

Optou-se pelo uso do gás de arraste de pó como gás adicional. Uma das características marcantes desse modelo de tocha são os vários orifícios de saída de gás de arrasto dispostos circunferencialmente ao orifício de plasma formando um anel externo de gás. O gás utilizado foi

o argônio puro e diversas vazões foram ensaiadas desde 2 até 0,2 l/min. Começando com a maior vazão e com variações decrescentes os ensaios decorreram para se determinar qual a menor vazão de gás de arraste que permitia obter uma solda livre de defeitos. O uso da menor vazão que possibilite não ocorrer defeitos parte do pressuposto de comparação com as outras tochas nos maiores níveis de igualdade, sendo assim essa vazão adicional não deve influenciar significativamente na geometria do cordão (largura e penetração) e nos níveis de energia (tensão e potência). Valores tão baixos quanto 0,4 l/min resultaram em cordões de solda sem poros, porém nessa vazão a poça de fusão ficava muito instável, sendo o valor de 0,6 l/min um valor ideal para o prosseguimento dos ensaios.

4.3. A tensão de soldagem

Para avaliar a quantidade de energia que cada tocha disponibilizava para a soldagem, a cada novo cordão de solda com o auxílio do SAP (Sistema de aquisição de parâmetros) foram adquiridos os dados de tensão e corrente que seriam utilizados na determinação da potência. Como era de se esperar os níveis de tensão e potência alcançados pelas tochas Plasma foi significativamente superior à soldagem TIG. Na Figura 24 abaixo, está plotado um gráfico com a tensão para cada distância entre tocha e peça para todos os tipos de tocha utilizados.



A análise do gráfico permite observar que a tocha com os maiores níveis de tensão e consequentemente potência é a tocha Plasma-pó PP-6-01. Essa diferença chega até o limite de 84% maior quanto se compara a distância do eletrodo-peça do processo TIG de 4mm com a distância bico de contato-peça do processo plasma que somado ao recuo do eletrodo resulta em uma distância eletrodo peça de 6,7 mm. Quando as distâncias comparadas são aquelas relativas ao eletrodo-peça essa diferença cai um pouco, 78%, mas ainda muito superior à tensão no processo TIG. Outra característica observada a partir das aquisições é que essa diferença relativa de tensão entre os processos TIG e Plasma, com a tocha PP-6-01, diminui com o aumento da distância eletrodo-peça. Assim para a menor DEP analisada (4mm) a diferença que era de 78% passa a ser 48% quando relativa a DEP de 10mm.

A informação de que a diferença relativa entre as tensões de cada processo diminuem com o aumento da distância eletrodo-peça permite outra avaliação. Fazendo a linearização dos dados do gráfico anterior e analisando os coeficientes angulares de cada reta pode-se concluir que essa

diminuição

Figura 24 – Gráfico de tensão para diferentes distâncias bico de contato-peça para as tochas em estudo.

ão

ocorre para todas as tochas Plasma uma vez que a curva de dados do processo TIG possui o maior coeficiente angular. A tocha que possui um coeficiente angular dos dados apenas um pouco menor que o do processo TIG é a tocha TBi PLP 300, por isso a diminuição das diferenças de tensão são um pouco menor. Todas as diferenças de tensão em relação à DEP são mostradas na Tabela 11 abaixo.

Dep \ Tocha	TBi PLP 300	PTS 3 Lab	PP-6-01	PWM 350	PWM 350 furos tapados	PWM 300
4 mm	39	46	78	68	71	47
7 mm	31	36	59	60	58	40
10 mm	30	25	48	42	48	33

Tabela 11 – Diferença percentual do valor de tensão do arco comparado à tocha TIG para diferentes distâncias eletrodo-peça.

Como mostrado na Tabela anterior, a tocha PP-6-01 apresentou os maiores valores de tensão seguido da tocha PWM 350 com os furos tapados.

Quando a comparação é em relação à distância bico de contato-peça, como mostrado na Tabela 12, as diferenças aumentam um pouco, porém faz parte do propósito desse trabalho

avaliar se essa forma de comparação é válida uma vez que somado ao recuo do eletrodo esse último estaria mais longe da peça o que fisicamente resultaria em maior tensão. Portanto, o resultado dessa maior tensão não seria causada pelas características do processo Plasma, mas sim por um maior distância entre eletrodo e peça.

Tocha DBCP	TBi PLP 300	PTS 3 Lab	PP-6-01	PWM 350	PWM 350 furos tapados	PWM 300
4 mm	51	57	84	71	82	62
7 mm	47	41	70	63	64	51
10 mm	34	31	58	48	53	42

Tabela 12 – Diferença percentual do valor de tensão do arco comparado à tocha TIG para diferentes distâncias bico de contato-peça.

Para explicar esse aumento da tensão para diferentes tipos de tocha é preciso analisar as características de cada uma. Considerando que a tensão do arco é a representação da dificuldade de transmitir elétrons, então se tem que para uma mesma altura de arco, que está diretamente ligada à distância entre o eletrodo e a peça, ou seja, aos polos positivo e negativo, o fenômeno físico apresentaria uma mesma resistência, o que para uma mesma corrente resultaria no mesmo valor de tensão para qualquer tocha. Porém, a afirmativa anterior não foi confirmada nos ensaios deste trabalho, não que ela esteja incorreta, apenas o que diz a literatura não foi verificado na prática.

A partir da análise anterior é preciso buscar razões para diferentes valores de tensão para uma mesma resistência elétrica. E é justamente essa última a possível causadora dos valores desiguais. Para que diferentes tochas, com a mesma DEP, tenham tensão do arco diferente é preciso que haja diferentes resistências e é esta característica que será analisada. Como pode ser visto na Figura 25 acima uma das diferenças entre as tochas são os respectivos bicos plasma, cada um com uma geometria única e com diferentes regiões para a refrigeração.

De todas as tochas analisadas no presente trabalho a que representa tipicamente a soldagem Plasma melt-in autógena na forma de sua construção é a tocha PWM 300. Todas as outras tochas são concebidas com uma proposta diferente. A PMW 350 é altamente recomendada para a soldagem Plasma keyhole e as demais tochas são aplicadas a soldagem com pó para revestimento onde a principal característica é a baixa diluição do pó no material de base. Assim também é possível comparar as tochas Plasma entre si de acordo com a finalidade principal de

cada uma, o que mostra que a escolha da tocha é um ítem altamente relevante no momento da caracterização de um processo.

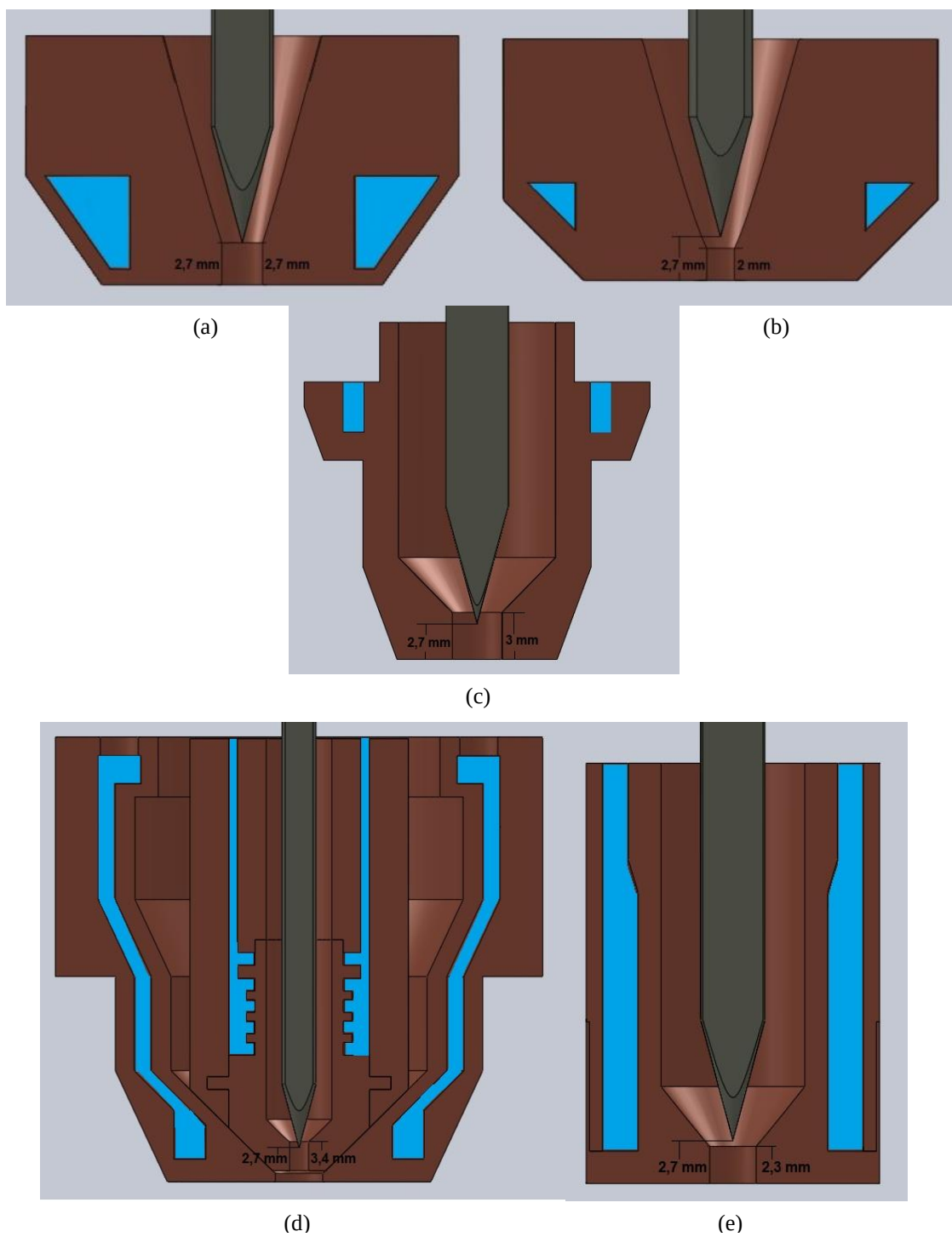


Figura 25 – Desenho em corte da geometria dos bicos plasma de cada tocha.

Usando como geometria de referência o bico da tocha TBi PLP 300 (Figura 25-a) temos que o Lc (comprimento de constrição) é igual a 2,7 mm, sendo esse valor igual ao recuo do eletrodo o arco ao se estabelecer entre o eletrodo e a peça – arco transferido – é constrito em sua totalidade. O Lc da tocha PTS 3 é menor, 2 mm, assim o arco surge com formato de sino até passar pelo orifício plasma onde passa a ser concentrado. Esse fenômeno representa uma perda de energia que se caracteriza como um aumento de tensão para DEP até 7 mm. Para valores superiores ao anteriormente citado, a tocha desenvolvida pelo Labsolda apresenta menor tensão do arco do que a tocha de referência. Essa mudança de comportamento pode ser explicada pelas diferenças em relação à refrigeração. Para distâncias eletrodo-peça maiores que 7 mm o aumento da tensão devido aos efeitos de constrição relatados acima é mais que compensado por uma refrigeração que impõe menos resistência ao estabelecimento do arco.

A proximidade dos valores de tensão entre as tochas TBi PLP 300 e PTS 3 com a tocha PWM 300 evidencia a origem do projeto das duas primeiras, altamente baseado na concepção de uma tocha plasma modificada para a aplicação com pó metálico.

Com relação à tocha PMW 350 a tensão é significativamente maior do que a tocha de referência. Entre a configuração com fluxo de gás pelos orifícios auxiliares e com esses furos tapados tem-se que com um fluxo de gás adicional a tensão do arco diminui um pouco. Esse comportamento era esperado uma vez que esse fluxo externo protege o arco da atmosfera circundante e facilita a abertura do mesmo.

Já a maior tensão da tocha PMW 350 em relação à tocha da TBi pode ser explicada pela soma de dois fatores. O primeiro fator é o recuo do eletrodo maior que o comprimento de constrição, assim, de maneira similar ao já explicado para o caso da tocha PTS 3, o arco tem formato de sino até encontrar o orifício constritor perdendo energia. O segundo fator é a grande área de contato da água fria proveniente do dispositivo de refrigeração que extrai calor do arco precisando desse último de mais energia para se manter entre a ponta do eletrodo e a poça de fusão.

A tocha PP-6-01 é a que apresenta a maior tensão entre todas as tochas analisadas e a observação do corte da geometria do seu bico plasma juntamente com o bocal focalizador na Figura 25-d, explica a razão dessa alta tensão. Mesmo essa tocha tendo um Lc maior do que o recuo do eletrodo, ou seja, o arco é estabelecido no interior do cilindro formado pelo orifício constritor, e ter ainda um fluxo adicional de gás com vazão de 0,6 l/min que tenderiam a diminuir

a tensão do arco, essa se manteve alta independentemente da DEP. O referido na última frase seria uma contradição não fosse novamente o efeito da refrigeração considerado. Vendo novamente a Figura 24, tem-se que a tocha que obteve a maior tensão do arco é a mesma que tem a maior área de contato entre bocal e eletrodo com a água de refrigeração. Assim, pode-se concluir que o efeito da extração de calor do arco pela refrigeração é maior do que os efeitos de diminuição da resistência pelo gás adicional e pelo comprimento de constrição.

4.4. A geometria da solda

Além de avaliar a tensão do arco mediante cada tipo de tocha, outra diferença está na geometria do cordão. Um gráfico com os valores da largura dos cordões de solda é apresentado na Figura 26 abaixo para cada tipo de tocha.

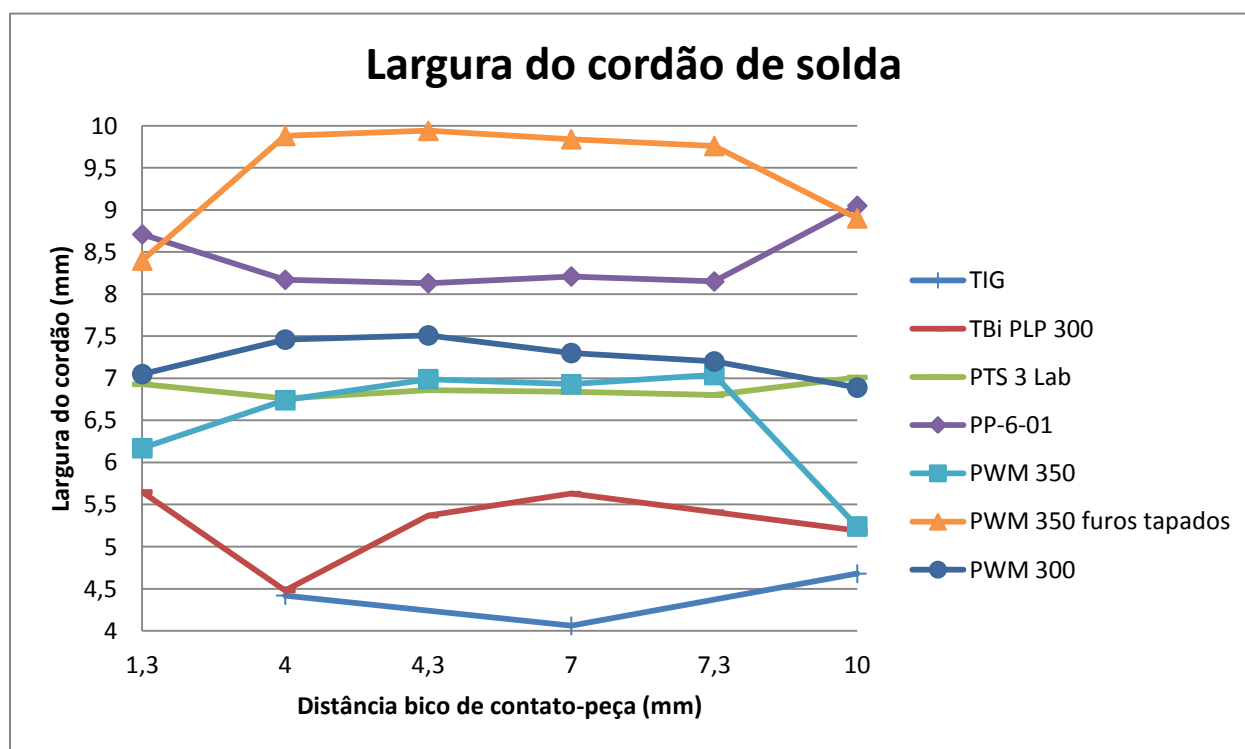


Figura 26 - Gráfico da largura dos cordões de solda para diferentes distâncias bico de contato-peça para as tochas em estudo.

Em relação à largura, a característica da tocha TIG é resultar em cordões com largura média de 4,5 mm com variação máxima de 15% para diferentes alturas de arco. A largura do

cordão diminui com o aumento da DEP de 4 para 7 mm e depois aumenta para maiores distâncias entre pólos.

A tocha PLP 300 da TBi forma cordões com largura média maior que a tocha TIG e pode se perceber uma tendência de diminuir a largura com o aumento da distância entre tocha e peça.

A tocha PTS 3 projetada pelo Labsolda apresenta um comportamento de soldar cordões com praticamente a mesma largura independentemente da altura do arco.

A tocha ucraniana, PP-6-01, permitiu obter cordões com largura sempre acima de 8 mm. Essa tocha tende a grande largura de cordão para DBCP de 1,3 mm diminuindo com o aumento dessa variável até 7,3 mm. Para valores maiores com 10 mm a largura do cordão volta a aumentar.

A tocha PMW 350 apresenta o mesmo comportamento com ou sem fluxo de gás pelos furos auxiliares, diferindo apenas na ordem de grandeza das larguras que é significativamente maior quando os furos auxiliares são tapados. Quando os furos auxiliares foram tapados obtiveram-se as maiores larguras de cordão chegando a 10 mm. A curva característica dessa tocha para a largura do cordão cresce desde 1,3 até 7,3 mm e diminui para a altura de 10 mm.

A tocha PWM 300 apresenta um comportamento bem marcante. A largura da face do cordão aumenta com o aumento da distância entre tocha e peça obtendo seu valor máximo para DBCP de 4,3mm. A partir desse valor a largura diminui até um mínimo em DBCP igual a 10 mm, menor inclusive do que para a menor distância avaliada.

Estendendo agora a análise da geometria dos cordões de solda para a penetração do mesmo no material de base, podemos ver na Figura 27 abaixo um gráfico com os valores de penetração para cada ensaio realizado.

Com pode ser visto na referida figura para a tocha TIG a penetração não muda com o aumento da distância do eletrodo de 4 para 7 mm em relação à chapa, aumentando apenas quando a DEP é igual a 10 mm.

A tocha da TBi apresenta uma tendência de resultar em alta penetração quando a tocha está muito próxima do material a ser soldado, diminuindo essa profundidade de material fundido até DBCP de 7,3 mm. Ao aumentar ainda mais essa altura a penetração tende a aumentar chegando aproximadamente a 2 mm. A tocha PTS 3, que possui geometria semelhante a tocha anteriormente citada, apresenta mesmo comportamento em relação à penetração da solda diferindo apenas para baixas distâncias bico de contato-peça onde a profundidade de material

fundido se mantem em valores mais baixos e com pouco variação. As tochas PP-6-01 e PWM 350 com os furos auxiliares apresentaram resultados com grande variação no quesito penetração do cordão de solda. A primeira varia seus resultados em torno de 1,46 mm, sendo que a penetração é maior quando a tocha está próxima da chapa a ser soldada do que quando a tocha está afastada ao máximo. A segunda, apesar da instabilidade dos resultados, apresenta o maior valor de penetração quando a tocha está a 1,3 mm da chapa e tende a diminuir essa profundidade quando se aumenta a DBCP.

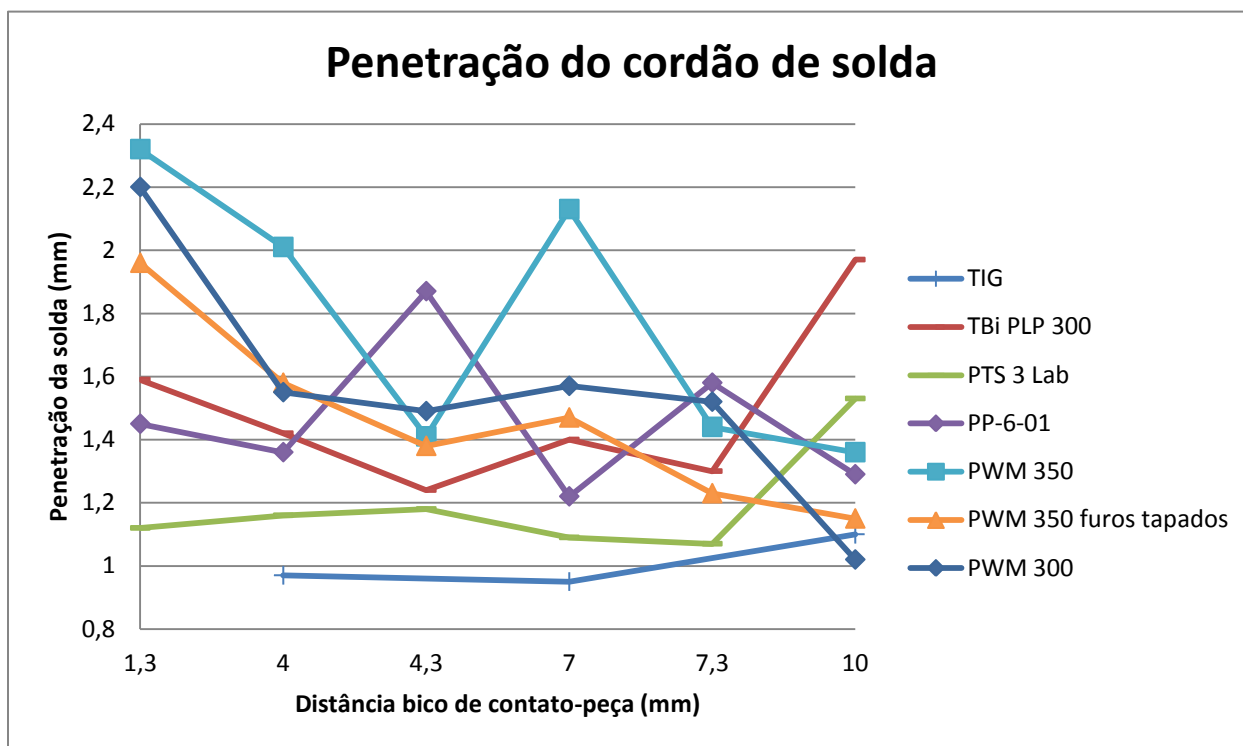


Figura 27 – Gráfico dos resultados da penetração da solda para cada tipo de tocha avaliado.

Já quando bloqueamos a saída do gás adicional na tocha PMW 350, os resultados apresentam uma característica bem marcante, a penetração começa alta, próxima à 2 mm, e vai diminuindo gradativamente até menos de 1,2 mm com o aumento da distância bico de contato-peça.

A tocha PWM 300 tem o maior valor de penetração para a menor distância entre tocha e peça. A penetração diminui com o aumento da altura do arco.

5. Conclusão

A comparação entre os processos TIG e Plasma, objetivo desse trabalho, foi feita de maneira a esclarecer melhor as principais características de cada um. Uma vez que o entendimento de um processo é o melhor caminho para o seu uso maximizado, esse documento se mostra uma pequena contribuição para o desenvolvimento da tecnologia de soldagem relacionada ao uso de eletrodos não consumíveis.

A soldagem Plasma por usar uma tocha mais complexa e com maior número de componentes necessita de maiores cuidados durante a operação. Um fato que ficou evidente ao longo dos ensaios foi que alterações nas características de construção da tocha têm feito direto na qualidade do cordão de solda resultante. Para usar a tocha TBi PLP 300 para distâncias bico-peça de 1,3 mm foi necessário cortar o bocal de proteção, o que para distâncias maiores causava uma modificação no escoamento do gás responsável por manter o oxigênio do ar afastado do metal líquido dando origem a poros na solda.

Outra conclusão que pode ser tirada com a operação de vários modelos de tochas é que cada tocha foi desenvolvida para uma aplicação determinada. Assim, se a mesma for utilizada para outros modos de soldagem poderá haver problemas e necessidade de adequação. Esse foi o caso da tocha Plasma-Master PP-6-01, altamente recomendada pelo fabricante para a soldagem Plasma com adição pó para revestimento, que necessita do uso de gás auxiliar para poder resultar em cordões de solda sem defeitos.

Foi visto no histórico de cada processo que o Plasma foi desenvolvido através de uma modificação do TIG pela constrição do arco. Por essa razão nas aquisições se vê que nos dois processos a tensão aumenta com o aumento da distância entre tocha e peça. Porém enquanto no TIG temos um aumento linear com a distância no Plasma esse aumento é mais complexo. Isso se deve a maior quantidade de variáveis nesse último o que acaba refletindo na facilidade ou não de se estabelecer o arco voltaico. Assim, o aumento de tensão que ocorre de 4 para 7 mm não é o mesmo do que de 7 para 10 mm.

As duas tochas que apresentaram maiores valores de tensão foram a PP-6-01 e a PMW 350. Esse fato concorda com dois resultados citados anteriormente: a finalidade da tocha é fator importante para sua aplicação e a refrigeração necessária para manter a integridade dos componentes extrai uma quantidade de calor significativa a ponto de impor maior dificuldade para a abertura do arco. Isso foi confirmado na análise dos bicos plasma e sua área de contato com água fria e no fato dessas tochas serem concebidas principalmente para a soldagem Plasma

pó de revestimento (PP-6-01) e para a soldagem Keyhole (PMW 350). Ainda a respeito dessa última, quando os furos auxiliares são obstruídos ocorre um leve aumento de tensão.

Talvez a conclusão mais importante com relação à análise da tensão do arco para todas as tochas foi de que em nenhum ensaio a tensão do arco Plasma foi o dobro da tensão do arco TIG com afirmam as referências citadas na fundamentação desse trabalho. Foi constatado que quanto a comparação é feita entre as distâncias eletrodo até peça para o TIG com distância entre bico e peça para o Plasma a tensão do segundo foi até 84% maior na tocha PP-6-01, mas isso considerando que essa tocha foi projetada para a soldagem de revestimento com adição de pó. Em comparação com a tocha PWM 300, uma tocha típica de soldagem Plasma melt-in, a tensão foi apenas 62% maior ambos para 4 mm. Quando a constatação é feita considerando a distância eletrodo até peça para os dois processos essa diferença cai para 78% para a tocha PP-6-01 e 47% para a tocha PWM 300. Só para lembrar, essas verificações de desacordo com a literatura foram feitas utilizando um bico plasma de 3,2 mm de diâmetro e um recuo do eletrodo de 2,3 mm, sendo que as fontes bibliográficas consideradas não apresentam tais variáveis.

Uma variável foi introduzida nesse trabalho, o L_c representa o comprimento no qual o arco é constrito antes de sair do bico plasma. Foi visto que a variação desse comprimento nas diferentes tochas influenciou na tensão de soldagem. Isso se deve ao fato de que se o recuo do eletrodo é maior do que o L_c o arco é estabelecido entre o eletrodo e o bocal, adquirindo a forma de sino, e depois concentrado o que necessita de mais energia da fonte.

Na largura dos cordões de solda temos que para as tochas PWM 300, PMW 350 e PMW 350 com os furos tapados essa característica aumenta com o aumento das distâncias de 1,3 mm para 4 mm, se mantendo relativamente constante e diminuindo com o aumento de 7,3 mm para 10 mm. Sendo que a tocha com os cordões mais largos foi a PMW 350 com os furos tapados. A PP-6-01 apresenta um comportamento inverso, diminui a largura de 1,3 mm para 4 mm e aumenta de 7,3 mm para 10 mm. Indo de encontro com a informação de que o Plasma por ter um arco mais concentrado propicia cordões mais estreitos que o TIG, esse último apresentou as menores dimensões de largura. A tocha que teve os valores de largura mais próximos do TIG foi a TBi PLP 300.

Com relação a penetração do metal fundido os resultados foram os mais diversos possíveis. Um padrão de comportamento pôde ser notado para as tochas PMW 350 com os furos tapados e PP-6-01, onde a penetração diminui com o aumento da altura da tocha. As tochas TBi

PLP 300 e PTS 3 Lab também apresentam comportamento semelhante com valores de penetração relativamente constantes até um aumento com a mudança de altura de 7,3 mm para 10 mm. E indo ao encontro com a literatura o Plasma por ter um arco mais concentrado obteve sempre maior penetração do que o TIG para todas as tochas.

Referências

Fahrenwaldt Hans J., Schuler Volkmar. Praxiswissen Schweißtechnik.
www.tbi-industries.com

www.plasma-master.com.ua/eng/products/PP-6-01.html

www.sps-soldagem.com.br

www.corteplasma.com.br/Corte_Plasma.pdf

www.labsolda.ufsc.br

www.imc-soldagem.com.br