

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**  
**Gabriel Lucas Garcia Salgado**

**FUNDAMENTOS DA SOLDAGEM A PLASMA (PAW)**

**Taubaté – SP**  
**2017**

**Gabriel Lucas Garcia Salgado**

**FUNDAMENTOS DA SOLDAGEM A PLASMA (PAW)**

Monografia apresentada para obtenção do Certificado de Especialização pelo curso de Pós Graduação em Engenharia de Soldagem do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Engenharia Mecânica

Orientador: Eduardo Esperança Canetti

**Taubaté – SP**

**2017**

# Gabriel Lucas Garcia Salgado

## FUNDAMENTOS DA SOLDAGEM A PLASMA (PAW)

Monografia apresentada para obtenção do Certificado de Especialização pelo curso de Pós Graduação em Engenharia de Soldagem do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Engenharia Mecânica

**Data:**

**Resultado:** \_\_\_\_\_

### BANCA EXAMINADORA

Prof.

Assinatura: \_\_\_\_\_

Prof.

Assinatura: \_\_\_\_\_

Prof.

Assinatura: \_\_\_\_\_

## RESUMO

O processo de soldagem a plasma (PAW) é considerado uma ampliação do processo TIG, tendo como grande diferença a constrição da coluna do arco, existe um bocal constritor que limita o diâmetro e conseqüentemente aumenta a intensidade da fonte de calor.

O processo é definido como um processo a arco elétrico que produz união por fusão das partes a serem unidas, podendo ser o arco estabelecido entre o eletrodo e peça de trabalho ou eletrodo e o bocal de constrição, onde são utilizados dois fluxos de gases, sendo iguais ou diferentes, chamados gás de plasma e de proteção.

O presente trabalho irá abordar assuntos como o princípio de funcionamento do processo, os equipamentos necessários, consumíveis utilizados, quais os modos operantes, tipos de materiais soldáveis e suas juntas e os principais parâmetros na soldagem a plasma.

**Palavras-chave:** PAW; bocal constritor; parâmetros na soldagem.

## **ABSTRACT**

The plasma welding process (PAW) is considered an amplification of the TIG process, having as a great difference the constriction of the arc column, there is a constricting nozzle that limits the diameter and consequently increases the intensity of the heat source.

The process is defined as an electric arc process that produces union by fusion of the parts to be joined, being the arc established between the electrode and workpiece or electrode and the constriction nozzle, where two gas flows are used, being Equal or different, called plasma gas and protection.

The present work will address issues such as the principle of process operation, the necessary equipment, consumables used, which operating modes, types of weldable materials and their joints and the main parameters in plasma welding.

**Keywords:** PAW; Constricting nozzle; Welding parameters.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AWS	-	American Welding Society
ASME	-	The American Society of Mechanical Engineers
PAW	-	Plasm Arc Welding
ANSI	-	American National Standards Institute
ISO	-	International Organization for Standardization
TWI	-	The Welding Institute
TIG	-	Tungsten Inert Gas
GMAW	-	Gas Metal Arc Welding
CEF	-	Característica Estática de Fonte
K	-	Kelvin

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	7
1.1 OBJETIVO.....	7
1.2 JUSTIFICATIVA.....	8
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	8
2.1. Processos de soldagem .....	8
2.2. Soldagem a plasma .....	9
2.3 Princípios de operação.....	10
2.4 Comparação com o processo TIG.....	11
2.5 Abertura do arco.....	12
2.6 Arcos transferidos e não transferidos .....	13
2.7 Arco duplo .....	15
2.8 Equipamentos para soldagem.....	16
2.8.1 Fontes de energia.....	17
2.8.2 Módulo de controle plasma .....	18
2.8.3 Tocha de soldagem .....	18
2.8.4 Alimentadores de arame .....	20
2.8.5 Reguladores ou monitores de vazão a gás .....	20
2.9 Consumíveis.....	20
2.9.1 Eletrodo de tungstênio.....	21
2.9.2 Metais de adição .....	22
2.9.3 Gases .....	23
2.9.4 Gás de plasma .....	23
2.9.5 Gás de proteção .....	24
2.9.6 Gás de purga e de proteção adicional.....	24
2.10 Modos operacionais .....	25
2.10.1 Micro plasma .....	25
2.10.2 Melt-in.....	26
2.10.3 Keyhole .....	26
2.11 Tipos de juntas .....	26
2.12 Exemplos de parâmetros de soldagem .....	28
2.13 Variáveis do processo PAW código ASME IX.....	30
3. CONCLUSÃO.....	32

REFERÊNCIAS.....33

## **1. INTRODUÇÃO**

Soldagem pode ser definido como um processo que une dois ou mais componentes, usando uma fonte de calor, aplicando pressão ou não, para que sejam mantidas as propriedades físicas e químicas do material, e solda é o resultado da operação de soldagem.

A AWS (American Welding Society) define soldagem como: “ Processo de união de materiais usados para obter a coalescência localizada de metais e não-metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição”

Os processos de soldagem servem para fabricar produtos e estruturas metálicas, aviões e veículos espaciais, navios, locomotivas, veículos ferroviários e rodoviários, pontes, prédios, oleodutos, gasodutos, plataformas marítimas, reatores nucleares e periféricos, trocadores de calor, vasos de pressão, caldeiras, utilidades domésticas, componentes eletrônicos entre outros.

Segundo Houldcroft (1979) existem algumas determinações que os processos de soldagem devem garantir. A energia deve ser suficiente para que haja a união dos componentes, as superfícies devem estar limpas, ou seja, isenta de contaminações, garantir a proteção da poça de fusão do meio atmosférico, e monitorar as transformações de fases, para que se mantenham as propriedades físicas e químicas desejadas.

### **1.2 OBJETIVO**

Este trabalho tem por objetivo dar a ideia de funcionamento do processo PAW, que é uma amplificação do processo TIG, mostrando o quão é eficiente o processo para determinadas aplicações, e também exemplificar os modos de transferência, operação, equipamentos, consumíveis utilizados, e tipos de juntas a serem soldadas.

### **1.3 JUSTIFICATIVA**

Por ser um processo que não encontra grande aplicação industrial, possivelmente pelo desenvolvimento industrial ainda está em processo de crescimento, e também pela falta de conhecimento prático e dos parâmetros de soldagem a serem utilizados. O presente trabalho reuniu informações de outros autores que testaram na prática esses parâmetros, contribuindo então para levantar informações sobre o processo.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Processos de Soldagem**

De acordo com Brandi (1992) a maneira como os processos de soldagem podem ser classificados são devidos ao tipo de fonte de energia ou pela natureza de união. As fontes de energia empregadas são mecânica, química, elétrica e radiante.

Fonte Mecânica: A geração de calor é devido ao atrito, ondas de choque e também por deformação plástica.

Fonte química: A geração de calor é devida a reações químicas exotérmicas, ou seja que liberam calor.

Fonte elétrica: A geração de calor é feita por efeito joule, pelo uso de corrente elétrica, formando um arco elétrico

Fonte radiante: A geração de calor é devida a radiação eletromagnética ou feixe de elétrons.

A seguir em anexo uma tabela com exemplos de classificação dos processos de soldagem, seja pela fonte de energia ou natureza de união.

ARCO ELÉTRICO	BRASAGEM	ESTADO SOLIDO
<ul style="list-style-type: none"> <li>. com eletrodo nu</li> <li>. com eletrodo de carvão</li> <li>. com eletrodo revestido</li> <li>. com arame sólido e gás de proteção (MIG/MAG)</li> <li>. com arame tubular com ou sem gás de proteção</li> <li>. com arame sólido e fluxo (arco submerso)</li> <li>. com eletrodo de tungstênio não consumível</li> <li>. a plasma</li> <li>. de pinos</li> <li>. com hidrogênio atômico</li> </ul>	<p><b>FORTE</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>. a ar</li> <li>. por difusão</li> <li>. em forno</li> <li>. por indução</li> <li>. por infravermelho</li> <li>. por resistência</li> <li>. por tocha</li> <li>. a arco com eletrodo de carvão</li> </ul> <p><b>FRACA</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>. em forno</li> <li>. por indução</li> <li>. por resistência</li> <li>. por tocha</li> <li>. com ferro de solda</li> <li>. por infravermelho</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. por difusão</li> <li>. por forjamento</li> <li>. por fricção</li> <li>. por pressão a quente</li> <li>. por laminação</li> <li>. por ultrassom</li> <li>. por explosão</li> </ul>
RESISTÊNCIA	OUTROS	GAS COMBUSTIVEL
<ul style="list-style-type: none"> <li>. por centelhamento</li> <li>. por alta frequência</li> <li>. por projeção</li> <li>. por costura</li> <li>. por pontos</li> <li>. topo a topo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. por feixe de elétrons</li> <li>. por eletroescória</li> <li>. por indução</li> <li>. a laser</li> <li>. aluminotérmica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. oxiacetilênica</li> <li>. oxihídrica</li> <li>. ar-acetilênica</li> <li>. a gás sob pressão</li> </ul>

Tabela 1– Classificação dos processos de soldagem

Fonte: Neris (2012).

## 2.1 Soldagem a plasma

Segundo Reis e Scotti (2007) soldagem a plasma pode ser definido como um gás que esteja suficientemente aquecido tornando-se ionizado, isto significa que existem íons e elétrons livres que estão em equilíbrio. O gás quando está neste estado (plasma) conduz corrente elétrica e não é mais um isolante.

Um fator importante é o grau de ionização do gás, que significa a quantidade de número de elétrons livres, quanto maior este grau maior a energia consumida para a realização do trabalho e também maior será a temperatura do plasma (1000 a 30000K).

Não só de íons e elétrons livres o plasma é formado, mas também de vapores metálicos e o volume do arco também é formado por átomos gasosos, que não são ionizáveis. Na soldagem a plasma é possível obter altas taxas de intensidade de corrente, devido a baixa resistividade elétrica, ou seja quanto maior a temperatura, menor a resistividade elétrica, isso faz com que seja gerado calor suficiente e um aumento da temperatura para a fusão dos materiais de base e sua união. Devido a geometria interna da tocha, que faz com que haja uma constrição do arco, a velocidade do processo é muito alta e também uma alta concentração do arco, na soldagem a plasma o arco é denominado arco-plasma.

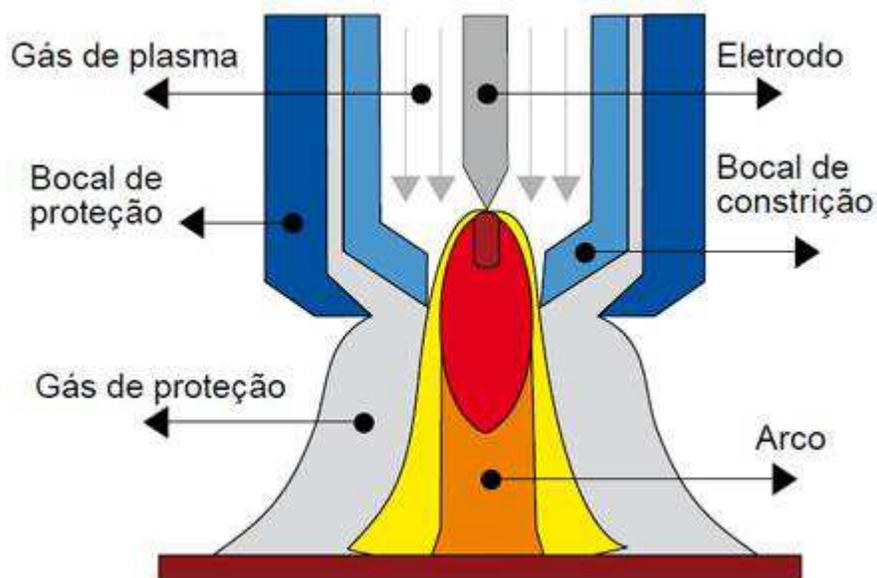


Figura 1—Representação esquemática da soldagem a arco plasma

Fonte: [metalica.com.br](http://metalica.com.br) acesso em 10/03/2017

### 2.3 Princípios de operação

A união dos materiais é feita através do aquecimento pelo arco que está constrito. O arco-plasma é obtido por uma coluna de gás (gás de plasma), que ao ser aquecido pelo arco elétrico, faz com que haja choques entre essas moléculas de gás, ocorrendo a dissociação e ionização, resultando na transformação do plasma.

Ainda segundo Reis e Scotti (2007) a pressão do gás e o efeito da expansão térmica na região do arco dentro da cavidade, resulta na evacuação do plasma pela tocha, por esse orifício constritor, a altíssimas velocidades, chegando a atingir níveis supersônicos.

Rela (1992) cita que a proteção da peça de fusão é feita de maneira relativa com o gás ionizado a alta temperatura, que transcorre pelo bocal de constrição. Um gás de proteção pode ser necessário para proteger a poça de fusão da oxidação do ar, esse gás de proteção pode ser inerte ou uma mistura.

## **2.4 Comparação com o Processo TIG**

A constrição do arco é o grande contraste do processo PAW em relação ao processo TIG, porque é com essa constrição que há um aumento da concentração do arco e o aumento da temperatura, outro fator é a maior tensão necessária para conduzir uma mesma intensidade de corrente.

De acordo com a Labsolda, uma outra diferença está na tocha de soldagem, no processo TIG o eletrodo de tungstênio fica fora do bocal de gás de proteção, já no PAW o mesmo eletrodo fica para dentro do bocal, por isso não há transferência metálica por curto-circuito no processo PAW, diferentemente do TIG.

Um aspecto que esses processos tem em comum, é que eles precisam de um sistema de alta tensão em alta frequência, para a geração de um ambiente ionizado.

Segundo Luz (2017), no processo TIG o eletrodo de tungstênio se estende para fora do bocal e é possível que se enxergue o arco, e sua forma parecida com um cone, isso faz com que haja uma região aquecida pelo arco. A superfície da área a ser soldada varia com a distância da tocha à peça, sendo assim havendo mudanças no comprimento arco, haverá mudanças na taxa de calor transferida para a peça.

Já no PAW, o eletrodo está no interior do bocal de constrição, o arco é apontado e focalizado, e é projetado numa pequena área a ser soldada, essa área quase não varia, se estiver dentro dos limites do comprimento de arco, ainda assim é

possível obter um maior comprimento de arco no processo PAW em relação ao TIG, o que permite uma melhor visibilidade para o soldador.

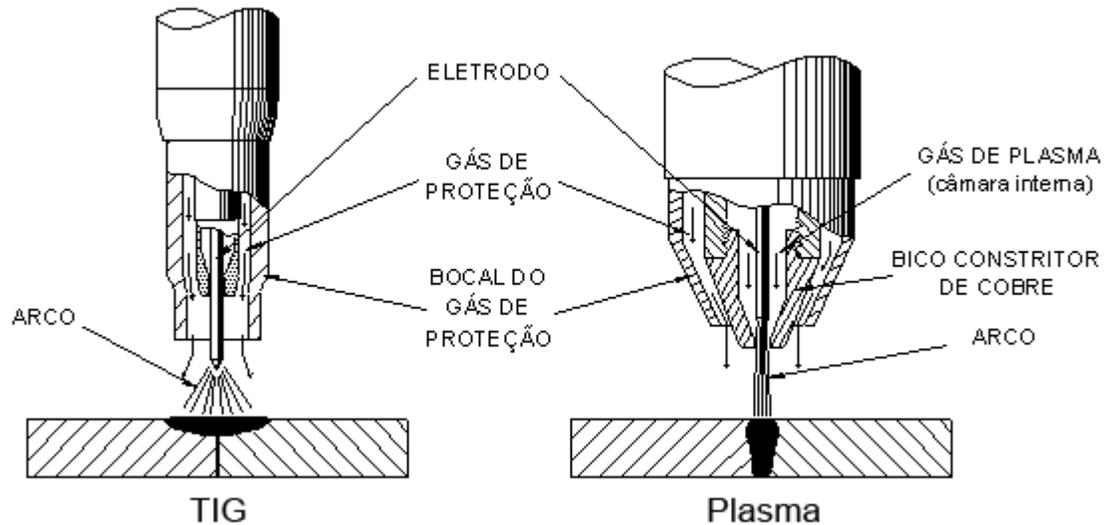


Figura 2- Diferenciação do Processo TIG e PAW  
Fonte:labsolda.ufsc.br acesso em 17/03/2017

## 2.5 Abertura do arco

A ignição da abertura de arco no PAW é diferente em comparação ao TIG, que é feita por alta tensão e frequência entre o eletrodo e a peça ou, pelo contato eletrodo-peça. Segundo Moura (2013), "a ignição é feita com a assistência de um arco-piloto de baixa potência aberto entre o eletrodo e o bocal de constrição, sob a presença de uma pequena vazão de gás de plasma e pela imposição de um sinal elétrico proveniente do ignitor de alta frequência.

De acordo com a TWI, após a essa abertura do arco-piloto, a ignição do arco principal é feita pela energização do circuito elétrico principal (eletrodo e metal de base), então esse espaço entre o eletrodo e a peça é chamado de tensão em vazio.

O arco-piloto serve apenas para a abertura do arco principal, após a formação do mesmo, o arco-piloto é extinto, porém se necessário várias aberturas, é aconselhável manter o arco-piloto sempre acionado, para que ele evite a contaminação

do eletrodo e também diminua o desgaste. Um outro benefício em manter o arco-piloto sempre aceso é que ele evita uma interferência nos controladores eletrônicos, devido ao pulso de alta tensão, que gera ruídos eletromagnéticos, causando assim interferência.

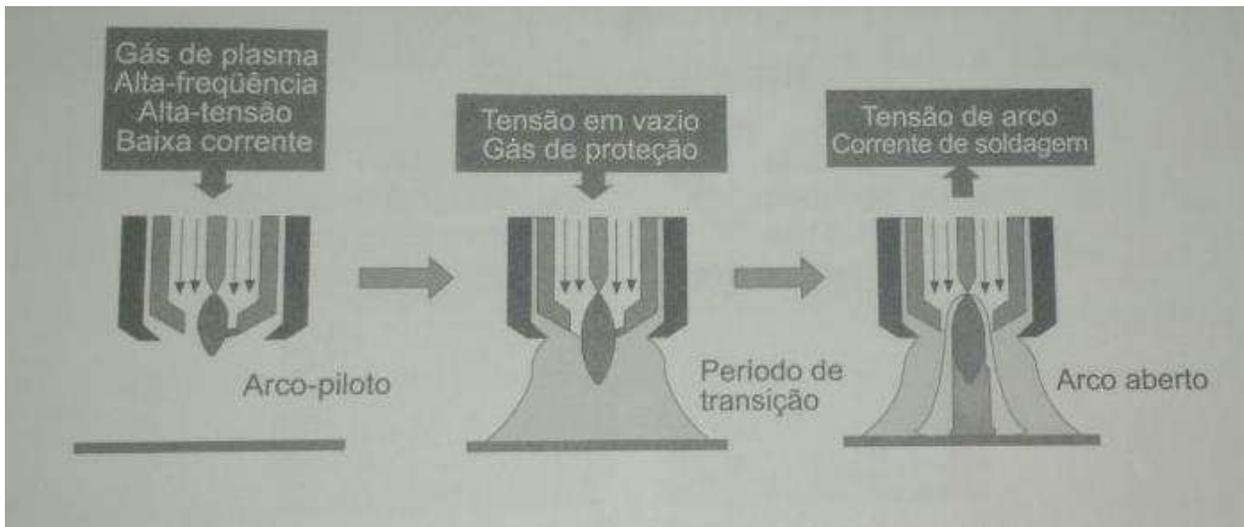


Figura 3 - Sequência de ignição do arco principal por meio de arco-piloto  
Fonte: (REIS e SCOTTI, 2007)

## 2.6 Arcos transferidos e não-transferidos

Na soldagem a plasma (PAW) existem 2 maneiras de operação: arco transferido e não transferido.

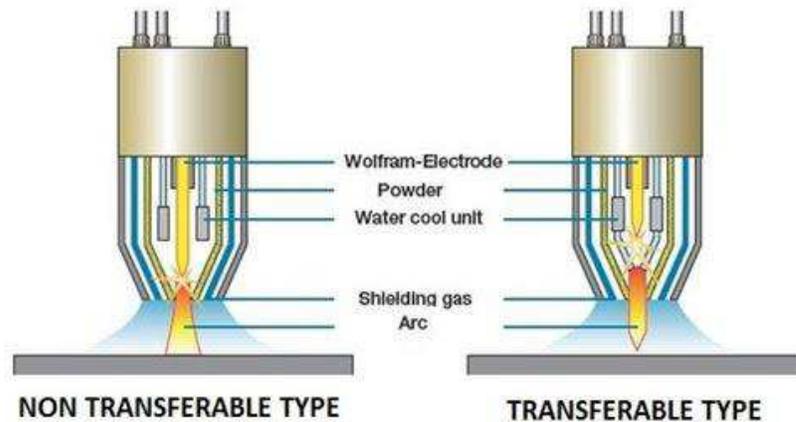


Figura 4 - Modos de operação (PAW) à esquerda não transferido, e à direita transferido  
 Fonte: techatmech acesso em 20/03/2017

Segundo Diaz, Dutra e Oliveira (2009), o arco transferido é constituído entre o eletrodo e a peça a ser soldada, e a maioria das aplicações é feita neste modo. Quando se opera desta maneira, a peça faz parte do circuito elétrico e recebe energia elétrica na forma de calor.

O eletrodo de tungstênio é ligado ao pólo negativo e a peça ao positivo, como existe uma dificuldade em iniciar o arco diretamente entre o eletrodo e a peça de trabalho, é necessário o auxílio do arco-piloto para a ignição do arco principal. Neste tipo de transferência a energia para a peça é maior, devido a peça ter a mancha anódica em sua superfície e também o jato de plasma ser incidido diretamente sobre ela.

De acordo com a Current Science, o arco não transferido é constituído entre o eletrodo e o bocal de constrição. Neste modo o fluxo de gás impõe que o plasma aquecido passe pelo orifício constritor da tocha, mesmo não conduzindo eletricidade até a peça. Sendo assim somente a energia térmica e a mecânica é que são operantes. Devido a eficiência de transferência de calor ser baixa, ocorre um super aquecimento no bocal de constrição, isso limita este modo operante, a soldar chapas finas. Mas existe a vantagem de soldar materiais que não conduzam eletricidade, ou mau condutores, devido a peça não fazer parte do circuito elétrico.

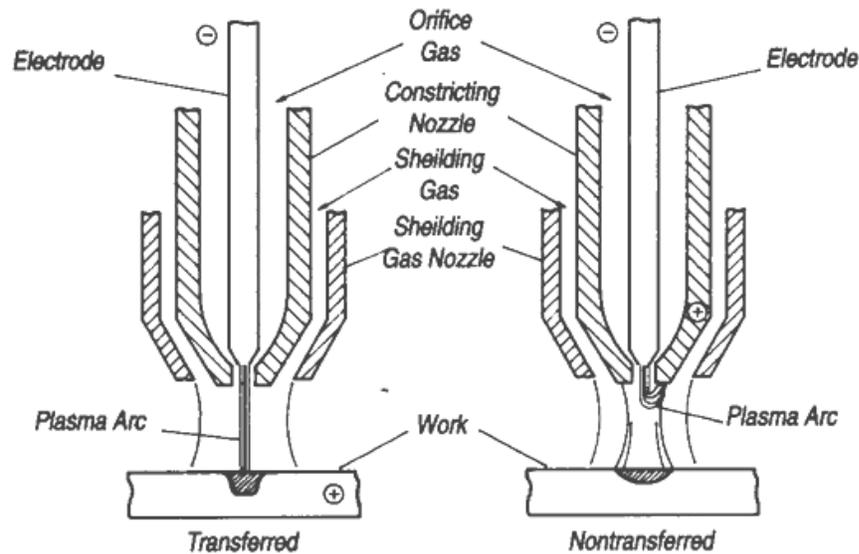


Figura 5 - A direita arco transferido (arco aberto entre o eletrodo e a peça), à esquerda não transferido (arco é aberto entre o eletrodo e o bocal de constrictão).

Fonte: techatmech acesso em 20/03/2017

## 2.7 Arco-duplo

A coluna do arco-plasma é isolada da parede interna do bocal de constrictão através duma camada de gás que está resfriada e que não conduz eletricidade, dessa maneira a camada funciona como um isolante térmico e elétrico, protegendo a superfície interna do bocal de constrictão. Caso haja elevados níveis de corrente, o isolamento pode ser rompido, e o arco flui primeiramente no bocal de constrictão, como consequência há um super aquecimento, e só depois passa a fluir na peça.

Segundo Reis (2005) isso é chamado de arco-duplo, os motivos são por excesso de corrente, vazão insuficiente de gás de plasma ou da ausência da camada de gás isolante, contato acidental do bocal de constrictão com a peça de trabalho (curto-circuito). O fenômeno do arco-duplo degenera o bocal de constrictão, desestabiliza o arco, causando má qualidade nos cordões de solda.

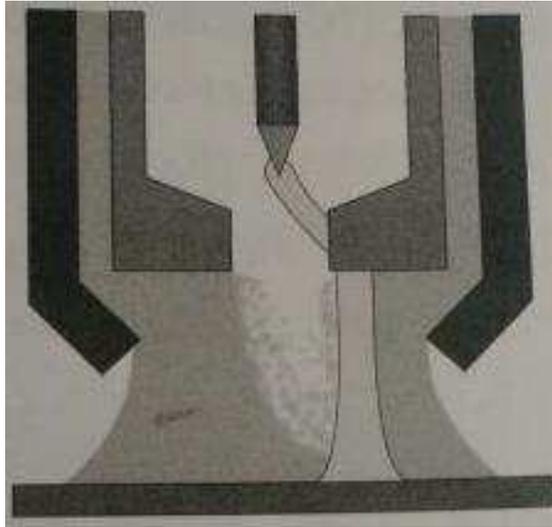


Figura 6 - Esquema de formação de arco-duplo  
Fonte: (REIS e SCOTTI, 2007)

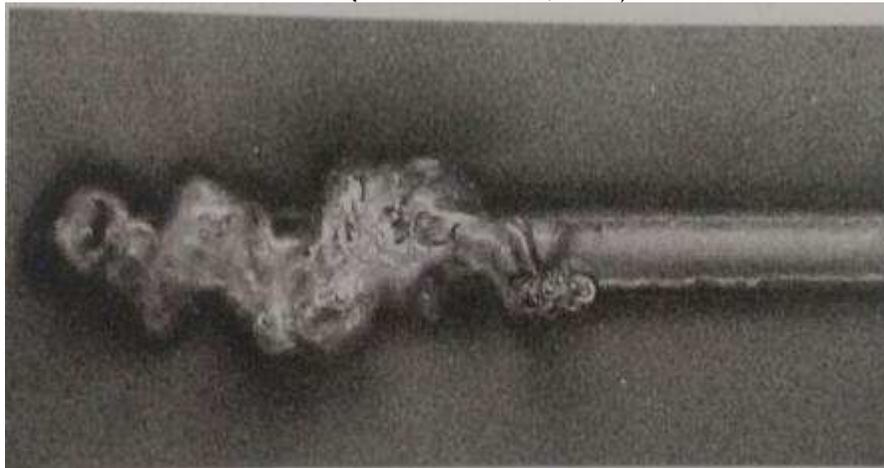


Figura 7 - Formação do cordão de solda devido ao arco-duplo  
Fonte: (REIS e SCOTTI, 2007)

## 2.8 Equipamentos para soldagem a plasma

Os equipamentos e componentes para execução de soldagem a plasma são: uma fonte de energia, sistema para abertura do arco, reguladores e monitores de vazão de gás, fonte de gases, sistema de controle e tocha de soldagem. Outros tipos de componentes podem até serem usados, para melhoria da soldagem ou para obter características e propriedades diferentes.

### 2.8.1 Fontes de energia

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2009), a fonte de energia é do tipo constante, e pode ser contínua ou pulsada. A capacidade varia entre correntes de 100 a 500 A, para fontes convencionais (eletromagnéticas), sendo que as de microplasma podem iniciar com valor de no mínimo 0,1 A.

A característica estática de fonte (CEF) do processo PAW é do tipo corrente constante, ou seja independe da carga imposta (impedância), a corrente sempre será a mesma.

Reis e Scotti (2007), citam que as fontes eletromagnéticas, com tensão em vazio da ordem de 65 a 80 V, podem ser consideradas satisfatórias quando se utiliza argônio ou mistura, com no máximo até 7% de hidrogênio. Outras misturas podem ser empregadas como por exemplo hélio, mas para valores mais elevados de hélio ou hidrogênio é necessário uma maior tensão em vazio, o que pode trazer riscos ao operador.

Já nas fontes eletrônicas é possível obter um maior controle da corrente, como por exemplo rampa de subida e descida, regulagem progressiva do tempo para atingir a nominal de soldagem e até a interrupção do arco.



Figura 8 - Fonte de energia  
Fonte: disponível em [arcraftplasma.com](http://arcraftplasma.com)

### 2.8.2 Módulo de controle plasma

O módulo de controle plasma é um dispositivo que controla as principais funções do arco-plasma. Segundo Reis (1992) o equipamento possui um circuito gerador de pulsos de alta tensão, para abertura do arco-piloto, que tem a função de manter a abertura a um baixo nível de corrente.

Possui outras funções como regulagem dos fluxos de gás de plasma e de proteção, e também para proteção do sistema de refrigeração da tocha.



Figura 9 - Módulo de controle  
Fonte: disponível em labsolda.ufsc.br/cesso em 17/03/2017

### 2.8.2 Tocha de soldagem

As tochas de soldagem do processo PAW podem ser manuais ou mecanizadas, variando com faixas de corrente de até 350 A. Todas as tochas são refrigeradas a água, devido a alta intensidade de calor.

O bocal de proteção possui a função de direcionar o gás de proteção, o eletrodo de tungstênio é fixado por uma pinça de cobre, e é posicionado através de um gabarito, existem outros componentes com a função de suportar, isolar eletricamente e termicamente e também para selar contra vazamento da água de refrigeração e gases.

As tochas manuais possuem a característica de terem menor capacidade, e não permitem a troca do bocal de constrição, não variando assim o diâmetro ou número de orifício, já as mecanizadas tem maior capacidade, podem variar o tamanho do diâmetro e também o número de orifícios.

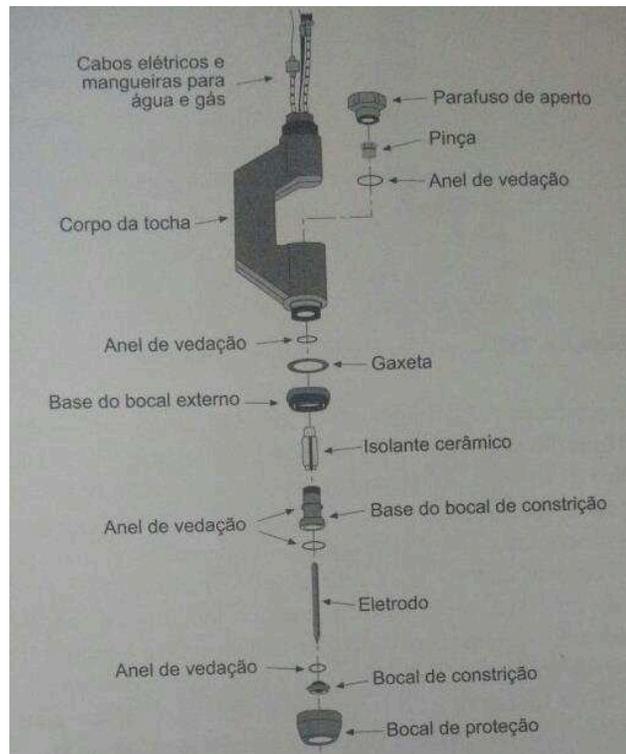


Figura10 - Componentes de uma tocha de soldagem PAW (mecanizado)  
Fonte: (REIS e SCOTTI, 2007)



Figura11 -Tocha manual (cima), tocha mecanizada (baixo)  
Fonte: disponível em tbi-brasil.com acesso em 18/03/2017

### **2.8.3 Alimentadores de arame**

Uma das formas de alimentação do arame é a manual, o soldador alimenta a poça de fusão pela ponta de uma vareta metálica, e a outra é mecanizada, com sistema de alimentação muito semelhante ao do processo GMAW, podendo ser ainda de maneira pulsada ou contínua, tendo então um maior ciclo de trabalho e um menor desperdício. Ainda é possível utilizar acessórios como um bico alimentador que fica a frente da tocha de soldagem e também uma caneta alimentadora.

### **2.8.4 Reguladores ou monitores de vazão de gás**

Os equipamentos geralmente utilizados são rotâmetros, com escalas específicas para cada gás, usa-se também monitores a base de turbinas e um outro com mais precisão chamados térmicos. Para gás de plasma são necessários medidores para baixas vazões, são sistemas mais complexos, já para monitoramento do fluxo dos gases de proteção, purga e proteção adicional, podem ser feitos por sistemas convencionais.

## **2.9 Consumíveis**

Os consumíveis que são utilizados no processo PAW são os gases de plasma e de proteção e também os metais de adição, o eletrodo de tungstênio é considerado também como um consumível apesar de não se fundir na poça, mas acaba sofrendo um desgaste.

### 2.9.1 Eletrodo de tungstênio

A seguir em anexo alguns exemplos com as especificações de eletrodos de tungstênio de acordo com algumas normas.

Designação	Composição (impurezas totais $\leq 0,1\%$ )		Cor de identificação
	Aditivo óxido	Tungstênio	
EWP		$\geq 99,95\%$	Verde
EWTh-2	ThO <sub>2</sub> : 1,7 - 2,2%	Balanço	Vermelho
EWLa-1.5	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 1,3 - 1,7%	Balanço	Dourado
EWLa-1	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 0,8 - 1,2%	Balanço	Preto
EWZr-1	ZrO <sub>2</sub> : 0,15 - 0,4%	Balanço	Marrom
EWCe-2	CeO <sub>2</sub> : 1,8 - 2,2%	Balanço	Alaranjado
EWLa-2	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 1,8 - 2,2%	Balanço	Azul
EWTh-1	ThO <sub>2</sub> : 0,8 - 1,2%	Balanço	Amarelo

Tabela 2 - Especificação de eletrodos de tungstênio, norma ANSI/AWS A5.12  
Fonte: Reis e Scotti (2007)

Designação	Composição (impurezas totais $\leq 0,1\%$ )		Cor de identificação
	Aditivo óxido	Tungstênio	
WP		$\geq 99,95\%$	Verde
WT20	ThO <sub>2</sub> : 1,7 - 2,2%	Balanço	Vermelho
WL15	LaO <sub>2</sub> : 1,3 - 1,7%	Balanço	Dourado
WC20	CeO <sub>2</sub> : 1,8 - 2,2%	Balanço	Cinza
WZ8	ZrO <sub>2</sub> : 0,7 - 0,9%	Balanço	Branco
WL10	LaO <sub>2</sub> : 0,9 - 1,2%	Balanço	Preto
WL20	LaO <sub>2</sub> : 1,8 - 2,2%	Balanço	Azul claro
WT10	ThO <sub>2</sub> : 0,8 - 1,2%	Balanço	Amarelo
WT30	ThO <sub>2</sub> : 2,8 - 3,2%	Balanço	Violeta
WT40	ThO <sub>2</sub> : 3,8 - 4,2%	Balanço	Alaranjado
WZ3	ZrO <sub>2</sub> : 0,15 - 0,5%	Balanço	Marrom
WY20	YtO <sub>2</sub> : 1,8 - 2,2%	Balanço	Azul

Tabela 3 - Especificação de eletrodos de tungstênio, norma ISO 6848  
Fonte: Reis e Scotti (2007)

### 2.9.2 Metais de adição

Grande parte é feita de maneira autógena, mas quando se deseja inserir elementos de liga ou quando se deseja diminuir o nível de porosidade por exemplo, existem os metais de adição. São disponibilizados em forma de varetas, para soldagem manual ou arames embobinados para soldagem automatizada ou mecanizada, e também em forma de pó metálico, este último é mais aplicado em revestimentos.

Em anexo, um exemplo da especificação AWS para metais de adição utilizados no processo PAW.

Especificação	Tipo de metal de adição
AWS A 5.7	Arames e varetas para a soldagem de cobre
AWS A 5.9	Arames e varetas para a soldagem de aços inoxidáveis
AWS A 5.10	Arames e varetas para a soldagem de alumínio
AWS A 5.14	Arames e varetas para a soldagem de níquel
AWS A 5.15	Arames e varetas para a soldagem de ferro fundido
AWS A 5.16	Aram es e varetas para a soldagem de titânio
AWS A 5.18	Arames e varetas para a soldagem de aço carbono
AWS A 5.19	Arames e varetas para a soldagem de magnésio
AWS A 5.21	Arames e varetas para revestimento
AWS A 5.22	Arames e varetas tubulares para soldagem de aços inoxidáveis
AWS A 5.24	Arames e varetas para a soldagem de zircônio
AWS A 5.28	Arames e varetas para a soldagem de aços de baixa liga

Tabela 4 - Especificação AWS de metais de adição (PAW)  
 Fonte: Bracarense, Modenesi e Marques (2009)

### 2.9.3 Gases

No processo PAW são utilizados ao menos dois fluxos de gás, o gás de plasma e o gás de proteção, que podem ser da mesma composição ou não. Existem ainda os gases de purga e proteção adicional, para a soldagem de materiais reativos, como por exemplo o alumínio.

### 2.9.4 Gás de plasma

É o gás usado para formação do arco-plasma, geralmente em baixas vazões, deve ser inerte ou redutor, dependendo do material a ser soldado, os gases são argônio e mistura de argônio com hidrogênio ou hélio.

O argônio é o mais usado, apesar de ser o que menos conduz calor, e ter baixo potencial de ionização, mas é o que melhor aciona ao arco-piloto e faz a abertura de arco.

O hidrogênio quando usado na mistura com o argônio produz uma maior concentração do plasma, ele reduz o diâmetro da coluna de plasma, aumentando a densidade de corrente, conseqüentemente aumenta a transferência de calor para a peça, podendo ser usado para atingir maiores velocidade de soldagem ou maior taxa de fusão.

O hélio tem semelhança quanto ao hidrogênio, por conseguir focalizar o plasma, é usado quando o uso do hidrogênio é restrito. Deve-se tomar cuidado quanto a quantidade de hélio, porque por ser um gás “mais quente”, pode danificar componentes da tocha.

### **2.9.5 Gás de proteção**

A escolha do gás de proteção depende do material a ser soldado, geralmente é o mesmo tipo de gás ao do gás de plasma, ou seja argônio ou misturas com hidrogênio, hélio, e também misturas de argônio com CO<sub>2</sub> ou CO<sub>2</sub> puro.

Os efeitos da escolha do tipo de gás são semelhantes ao do gás de plasma, com o argônio apresentando a menor penetração, o hélio conseguindo transferir mais calor para a peça, e o hidrogênio também ficando os cordões de solda com aspecto de limpeza, por ser um gás redutor.

### **2.9.6 Gás de purga e de proteção adicional**

Quando se deseja obter soldagens com penetração total, é essencial proteger a raiz contra a oxidação, então o gás de purga tem a função de expulsar o oxigênio da raiz. Os gases utilizados são nitrogênio com adições de hidrogênio ou argônio, argônio com hidrogênio.

## 2.10 Modos operacionais de soldagem

Existem 3 técnicas na soldagem a plasma, são elas, microplasma, melt-in e keyhole.

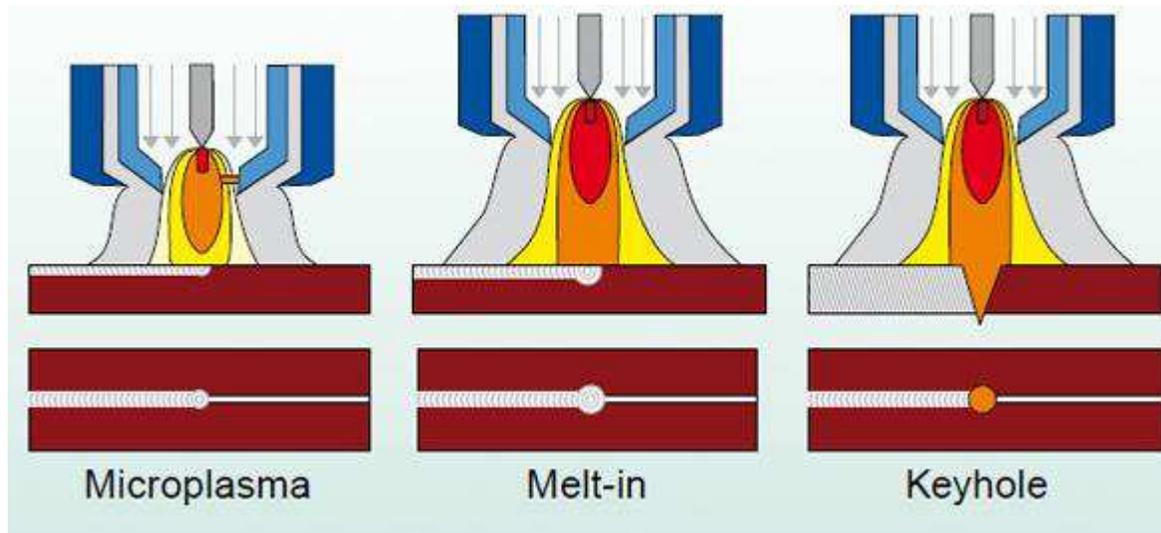


Figura 12 - Modos operacionais soldagem PAW  
Fonte: disponível em [metalica.com.br](http://metalica.com.br) acesso 10/03/2017

### 2.10.1 Microplasma

De acordo com Richetti e Ferraresi (1999), é uma técnica utilizada para soldagem de chapas finas, exemplo 0,1 mm, com correntes de soldagem entre 0,1 e 15 A. Esta técnica é caracterizada pela soldagem autógena, formando um pequeno arco, semelhante a uma agulha.

É utilizada mais manualmente, mas pode ser automatizada ou mecanizada, este tipo de técnica minimiza bastante as distorções, é usada para soldagem de instrumentos cirúrgicos e equipamentos eletrônicos.

### **2.10.2 Melt-in**

Segundo Modenesi e Marques (2011), neste modo de operação são utilizadas faixas de corrente de 15 a 200 A. A vazão do gás é baixa, variando de acordo com o diâmetro do eletrodo e também a faixa de corrente utilizada, são obtidos cordões estreitos e de maior penetração, em comparação ao TIG, sob condições similares.

Reis (2005), cita que neste modo a soldagem é automatizada, e é possível obter maiores velocidades de soldagem, e reduzir em até 50% as distorções, em comparação ao processo TIG, isto é devido ao fato da direcionabilidade do arco e da resistência a perturbações externas.

### **2.10.3 Keyhole**

Segunda Dutra, Diaz e Junior (1999), o modo keyhole também é chamado de buraco de fechadura, e são utilizadas faixas de corrente na ordem de 100 A, é uma técnica que difere das outras, pelo fato do jato de plasma atravessar a junta a ser soldada.

Junior e Dutra (1999), citam que a formação do keyhole quando o arco está sobre a peça, deslocando o metal fundido para as extremidades da poça de fusão, é como se fosse um escavamento no metal base, até que ele seja totalmente perfurado.

Esta técnica permite a soldagem em passe único, ela pode ser autógena e também ser soldada com metais de adição, sendo em arame ou pó, e é recomendada para juntas de topo sem chanfro, de até 10 mm espessura.

## **2.11 Tipos de Juntas**

De acordo com a Welding Handbook 15 ° edição, as juntas mais utilizadas na soldagem a plasma são junta de topo, em aresta, costura, sobreposta.

O tipo mais usual de junta utilizado nos três modos de operação é a junta de topo. No modo keyhole efetua-se a soldagem de juntas de topo, e também de costura, no melt-in e microplasma é comum a soldagem de juntas em aresta ou sobrepostas, na sobreposta a configuração é caracterizada por ser filete.

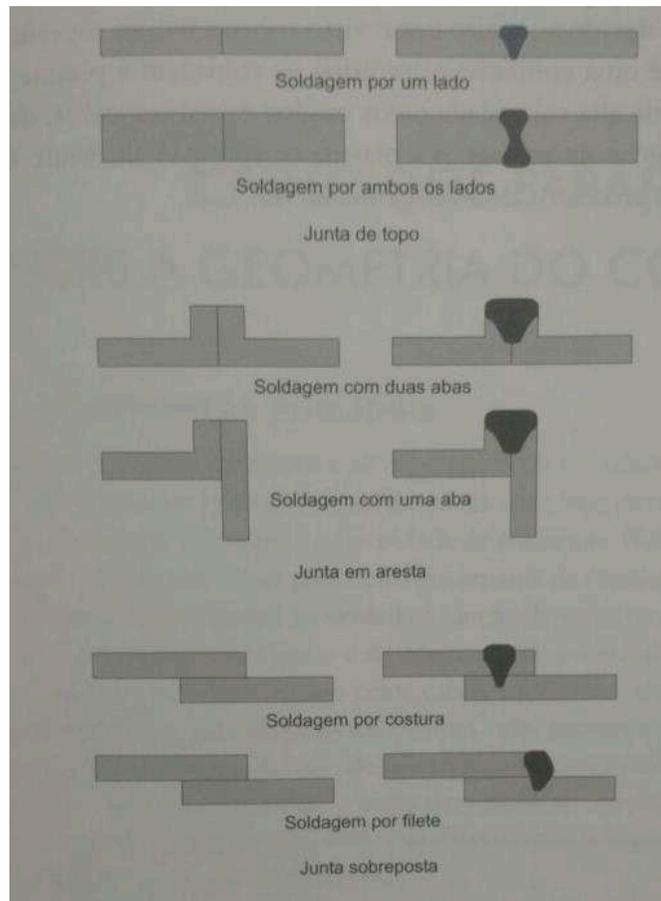


Figura13 - Configuração de juntas na soldagem PAW

Fonte: (REIS e SCOTTI, 2007)

## 2.12 Exemplos de parâmetros de soldagem

Material	Espessura (mm)	Veloc. Sold. (mm/s)	Corrente CC- (A)	Tensão (V)	Fluxo de gás (l/min)		Observações
					Orifício	Proteção	
Aço inoxidável	2,4	10	115	30	3 (a)	17	Técnica "keyhole", chanfro reto, 95% Ar, 5% H <sub>2</sub> , com uso de proteção no reverso e "stand-off" de 4,8 mm
	3,2	13	145	32	5 (a)	17	
	4,8	16	165	36	6 (b)	21	
	6,4	14	240	38	8 (b)	24	
Aço carbono e baixa liga	3,2	5	185	28	6 (a)	28	Técnica "keyhole", chanfro reto, Argônio, proteção no reverso e "stand-off" de 1,2 mm
	4,3	4	200	29	6 (b)	28	
	6,4	6	275	33	7 (b)	28	
Titânio	3,2	8,5	185	21	3,8 (a)	28	"Keyhole", chanfro reto, Ar ou Ar 75%-He 25% proteção no re- verso e "stand-off" de 1,2 mm
	4,8	5,5	175	25	9 (b)	28	
	10	4,2	225	38	15 (b)	28	

Tabela 5 - Parâmetros típicos na soldagem plasma

Fonte: Bracarense, Modenesi e Marques (2009)

Material	Espessura (mm)	Veloc. Sold. (mm/s)	Corrente CC- (A)	Fluxo de gás (l/min)		Observações
				Orifício	Proteção	
Aço inoxidável	0,13	2,0	2,4	0,24	10	Junta de topo com flange, 99% Ar, 1% H <sub>2</sub>
	0,25	3,4	6,0	0,24	10	
	0,80	2,0	10	0,24	10	
	1,50	2,0	28	0,40	10	
Titânio	0,20	2,0	5	0,24	10	Junta de topo com flange, 100% Ar
	0,56	3,0	10	0,24	10	

Tabela 6 - Parâmetros típicos na soldagem microplasma

Fonte: Bracarense, Modenesi e Marques (2009)

Material	Espessura (mm)	Técnica de soldagem	
		"Keyhole"	Fusão
Aço carbono	< 3,2	Ar	Ar
	> 3,2	Ar	75% He, 25% Ar
Aço de baixa liga	< 3,2	Ar	Ar
	> 3,2	Ar	75% He, 25% Ar
Aço inoxidável	< 3,2	92,5% Ar, 7,5% H <sub>2</sub>	Ar
	> 3,2	95% Ar, 5% H <sub>2</sub>	75% He, 25% Ar
Cobre	< 2,4	Ar	75% He, 25% Ar
	> 2,4	Não recomendada	He
Ligas de níquel	< 3,2	92,5% Ar, 7,5% H <sub>2</sub>	Ar
	> 3,2	95% Ar, 5% H <sub>2</sub>	75% He, 25% Ar
Metais reativos	< 6,4	Ar	Ar
	> 6,4	Ar-He (50 a 75% He)	75% He, 25% Ar

Tabela 7 - Gases usuais na soldagem (PAW)

Fonte: Bracarense, Modenesi e Marques (2009)

Técnica	Espessura (mm) →	0,1	0,4	1,6	3,2	4,8	6,4	10	13	19...
Passe único		←—————→								
"Keyhole"			←—————→							
Passes múltiplos						←—————→				...

Tabela 8 - Faixa de espessura para diferentes técnicas

Fonte: Bracarense, Modenesi e Marques (2009)

## 2.13 Variáveis do Processo PAW de acordo com o código ASME seção IX (2013)

**Table QW-257**  
**Welding Variables Procedure Specifications (WPS) — Plasma-Arc Welding (PAW)**

Paragraph	Brief of Variables	Essential	Supplementary Essential	Nonessential
QW-402 Joints	.1	$\phi$ Groove design	X	
	.5	+ Backing		X
	.10	$\phi$ Root spacing		X
	.11	$\pm$ Retainers		X
QW-403 Base Metals	.5	$\phi$ Group Number	X	
	.6	$T$ Limits	X	
	.8	$\phi$ $T$ Qualified	X	
	.12	$\phi$ P-Number/melt-in	X	
QW-404 Filler Metals	.3	$\phi$ Size		X
	.4	$\phi$ F-Number	X	
	.5	$\phi$ A-Number	X	
	.12	$\phi$ Classification		X
	.14	$\pm$ Filler metal	X	
	.22	$\pm$ Consum. insert		X
	.23	$\phi$ Filler metal product form	X	
	.27	$\phi$ Alloy elements	X	
.30	$\phi$ $t$	X		
.33	$\phi$ Classification			X
QW-405 Positions	.1	+ Position		X
	.2	$\phi$ Position	X	
	.3	$\phi$ $\updownarrow$ Vertical welding		X
QW-406 Preheat	.1	Decrease > 100°F (55°C)	X	
	.3	Increase > 100°F (55°C) (IP)		X
QW-407 PWHT	.1	$\phi$ PWHT	X	
	.2	$\phi$ PWHT ( $T$ & $T$ range)		X
	.4	$\phi$ Limits	X	
QW-408 Gas	.1	$\pm$ Trail or $\phi$ comp.		X
	.4	$\phi$ Composition	X	
	.5	$\pm$ Or $\phi$ backing flow		X
	.9	- Backing or $\phi$ comp.	X	
	.10	$\phi$ Shielding or trailing	X	
.21	$\phi$ Flow rate			X
QW-409 Electrical Characteris- tics	.1	> Heat input	X	
	.4	$\phi$ Current or polarity	X	X
	.8	$\phi$ I & E range		X
	.12	$\phi$ Tungsten electrode		X

**Table QW-257**  
**Welding Variables Procedure Specifications (WPS) — Plasma-Arc Welding (PAW) (Cont'd)**

Paragraph	Brief of Variables	Essential	Supplementary Essential	Nonessential	
QW-410 Technique	.1	$\phi$ String/weave		X	
	.3	$\phi$ Orifice, cup, or nozzle size		X	
	.5	$\phi$ Method cleaning		X	
	.6	$\phi$ Method back gouge		X	
	.7	$\phi$ Oscillation		X	
	.9	$\phi$ Multiple to single pass/side		X	X
	.10	$\phi$ Single to multiple electrodes		X	X
	.11	$\phi$ Closed to out chamber	X		
	.12	$\phi$ Melt-in to keyhole		X	
	.15	$\phi$ Electrode spacing			X
	.26	$\pm$ Peening			X
	.64	Use of thermal processes	X		

Legend:

+ Addition                      > Increase/greater than                      ↑ Uphill                      ← Forehand                       $\phi$  Change  
 - Deletion                      < Decrease/less than                      ↓ Downhill                      → Backhand

Tabela 9 - Variáveis para qualificação do processo PAW

Fonte: ASME seção IX (2013)

<b>Table QW-357</b> <b>Manual and Semiautomatic Plasma-Arc</b> <b>Welding (PAW)</b> <b>Essential Variables</b>		
Paragraph	Brief of Variables	
QW-402 Joints	.4	- Backing
QW-403 Base Metals	.16	$\phi$ Pipe diameter
	.18	$\phi$ P-Number
QW-404 Filler Metals	.14	$\pm$ Filler
	.15	$\phi$ F-Number
	.22	$\pm$ Inserts
	.23	$\phi$ Filler metal product form
QW-405 Positions	.30	$\phi$ $\epsilon$ Weld deposit
	.1	+ Position
QW-408 Gas	.3	$\phi$ $\updownarrow$ Vertical welding
	.8	- Inert backing

Legend:  
 $\phi$  Change                      ↑ Uphill  
 + Addition                      ↓ Downhill  
 - Deletion

Tabela 10 - Variáveis para qualificação de soldador processo PAW

Fonte: ASME seção IX (2013)

### 3. CONCLUSÃO

Na realização deste trabalho posso concluir que as principais variáveis na soldagem a plasma são a corrente de soldagem, diâmetro do orifício do bocal constritor, vazão de gás de plasma, vazão de gás de proteção e a velocidade de soldagem.

A corrente ela pode alterar a geometria do cordão de solda, e a vazão do gás de plasma também. O tipo mais usual de corrente é contínua com eletrodo no negativo, corrente contínua com eletrodo no positivo também pode ser usado, mas para casos específicos.

Já o diâmetro do orifício, influencia na constrição, concentração e intensidade do arco, e distribuição de calor, a escolha do diâmetro deve ser feita de acordo com a espessura. A penetração depende muito da vazão do gás, quanto maior a vazão maior a penetração.

A velocidade tem o mesmo efeito em comparação com os outros processos a arco, quanto maior a velocidade mais estreito e menor a penetração, quanto menor mais largo e maior penetração. E já a distância da tocha com a peça, apresenta pouca influência, devido ao formato do arco ser cilíndrico.

A soldagem a plasma pode ser feita em qualquer posição, em altas velocidades e uma menor energia de soldagem imposta, solda os mesmos tipos de materiais que o processo TIG, aço carbono, alumínio, titânio, aços inoxidáveis, e devido a alta estabilidade do arco, com o uso de intensidade de corrente muito baixa, é possível a soldagem de peças com espessuras inferior a 1 milímetro, o que é muito difícil de ser feito com outros processos.

## REFERÊNCIAS

American Welding Society (AWS)

ASME IX, **Welding, Brazing and Fusing Qualifications**, 2013.

BRANDI, S.D. **Processos e Metalurgia; Transferência metálica em soldagem com arco elétrico**. São Paulo: Blucher, 1992.

Current Science, vol. 83, número. 3, 10 August, 2002.

DIAZ, V.V, DUTRA, J.C, JUNIOR, R.G, **Análise dos Parâmetros e Variáveis da Soldagem Plasma Pela Técnica keyhole para a Determinação de Seus Graus de Relevância**, XXV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, 1999.

DIAZ, V.V, DUTRA, J.C, OLIVEIRA, A. S. C. M **Deposição por Plasma com Arco Transferido**, Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

HOULDCROFT, P.T. **Welding Process Technology**; Cambridge University Press, London, p.1-15,1979.

MARQUES, P.V, MODENESI, P.V, BRACARENSE A.Q **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**. 3ª edição. Belo Horizonte: UFMG, 2009.

MODENESI, P.J, MARQUES, P.V **Introdução aos Processos de Soldagem**, Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

MOURA, J.C.R, **Solda a ponto "oneside" utilizando arco Plasma: aplicação em peças de carroceria automotiva**, São Caetano do Sul, 2013.

NERIS, M.M **Eixo Tecnológico: Controle e Processos industriais**, 2012.

REIS, R.P, SCOTTI, A. **Fundamentos e prática da soldagem a plasma** São Paulo:Artliber, 2007.

REIS,R.P, **Soldagem Plasma "MELT IN" De Aço Comum ao Carbono**, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2005.

RELA, P.R. **Processos e Metalurgia; Processo de soldagem com plasma.** São Paulo: Blucher, 1992.

RICHETTI. A, FERRARESI, V.A, **Utilização Do Processo De Soldagem Por Plasma Com a Técnica "Keyhole" No Passe De raiz de Uma Junta em V**, Universidade Federal de Uberlândia, Departamento de Engenharia Mecânica, 1999

SILVA, S.R, **Desenvolvimento Do Processo De Soldagem Plasma-Keyhole – Mag Em Tandem**, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

Welding Handbook, **Special Welding Processes and Cutting**, section 3, fifth Edition

<http://www.arcraftplasma.com/plasma-welding-equipments.htm> acesso em 03/04/2017

<http://gelsonluz.com/o-que-e-soldagem-plasma-paw/> acesso em 17/03/2017

<http://guias.oxigenio.com/soldagem-plasma> acesso em 17/03/2017

[http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/projetos\\_viabilizados/modplasma.php](http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/projetos_viabilizados/modplasma.php) acesso em 17/03/2017

<http://www.metlica.com.br> acesso em 10/03/2017

<http://www.tbi-brasil.com/wp-content/uploads/2016/06/Plasma-welding.pdf> acesso em 04/04/2017

<http://techatmech.blogspot.com.br/2015/07/plasma-arc-welding-transferred-type.html> acesso em 20/03/2017

<http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/plasma-arc-welding-007/> acesso em 18/03/2017