

Neviton Freire Filho

**ADEQUAÇÃO DO PROCESSO HÍBRIDO
DE SOLDAGEM NO LABORATÓRIO DE
SOLDAGEM DA UFES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. º Dr.º Temístocles de Sousa Luz

VITÓRIA
2011

Neviton Freire Filho

ADEQUAÇÃO DO PROCESSO HÍBRIDO DE SOLDAGEM NO LABORATÓRIO DE SOLDAGEM DA UFES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em 06 de julho de 2011.

COMISSÃO EXAMINADORA

Profº Drº Temístocles de Sousa Luz
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Orientador

Profº Drº Flávio José da Silva
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
1º Examinador

Profº Especialista Valter Luiz dos Santos Cordeiro
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
2º Examinador

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Temístocles de Sousa Luz, pelo apoio e a orientação neste trabalho.

Ao Dr. Eng. Raul Gohr Jr. e ao mestrando Rafael Polezi Lucas, pela ajuda na etapa de montagem dos equipamentos.

A Universidade Federal do Espírito Santo pela bolsa e a viabilização deste trabalho

“Sonha e serás livre de espírito... Luta e serás livre na vida. ”
Che Guevara

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	3
SUMÁRIO	5
ÍNDICE DE FIGURAS	6
SIMBOLOGIA	10
RESUMO.....	12
1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVO	13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DO PROCESSO.....	15
2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG	15
2.1.1 Características dos gases no processo de Soldagem MIG/MAG	16
2.1.2 Características do arco e da fonte no processo de Soldagem MIG/MAG	18
2.1.3 Forças governantes da transferência metálica no processo de Soldagem MIG/MAG.....	20
2.1.4 Modos de transferência metálica no processo de soldagem MIG/MAG	27
2.2 PROCESSO DE SOLDAGEM A PLASMA.....	31
2.2.1 Princípios da soldagem TIG	31
2.2.2 Características da soldagem a Plasma	32
2.3 PROCESSO PLASMA-MIG	38
2.3.1 Características térmicas do processo Plasma-MIG	42
2.3.2 Características elétricas do arco do processo Plasma-MIG	45
2.3.3 Tipos de Transferência Metálica Plasma-MIG	49
2.3.4 Taxa de Fusão do Arame-eletrodo	55
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	59
3.1 EQUIPAMENTOS	59
3.2 METODOLOGIA.....	63
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
5 CONCLUSÃO.....	67
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho esquemático do processo de soldagem MIG/MAG (OLIVEIRA, 2006).....	15
Figura 2 - Efeito dos gases sobre a penetração (WWW.OXIBRAS.COM.BR, acesso em 28 de maio 2011)	17
Figura 3 - Desenho esquemático da CEA para diferentes comprimentos de arco (SCOTTI, 2008).....	18
Figura 4 - Característica estática de duas diferentes fontes de energia para soldagem. 1 - Tipo tensão constante; 2 - Tipo corrente constante (QUITES, 1979).....	19
Figura 5 - Representação esquemática do ponto de trabalho em fontes do tipo corrente constante (á esquerda) e tensão constante (á direita). A CEA 2 representam arcos de maior comprimento do que os da CEA 1 (MATERIAL DE AULA, 2011).....	20
Figura 6 - Forças governantes no processo MIG/MAG (SCOTTI, 2008).....	21
Figura 7 - Ilustração da ação da força gravitacional (SCOTTI, 2008).	22
Figura 8 - Ilustração do crescimento competitivo entre as forças gravitacional e a força devido a tensão superficial (SCOTTI, 2008).	23
Figura 9 - Mudança na direção de atuação da força devido a tensão superficial, quando a gota toca a poça (SCOTTI, 2008).	23
Figura 10 - Fenômeno da geração das forças eletromagnéticas na gota de metal líquido de forma cilíndrica (SCOTTI, 2008).	24
Figura 11 - Ilustração da direção do movimento da gota devido á força eletromagnética (SCOTTI, 2008).	25
Figura 12 - Ilustração do processo de empescoçamento (SCOTTI, 2008).	25
Figura 13 - Ilustração do fenômeno da geração da força de arraste pelo fluxo de gás na gota (SCOTTI, 2008).....	26
Figura 14 - Efeito da força de reação por evaporação sobre a transferência metálica (SCOTTI, 2008).....	26
Figura 15 - Desvio da gota devido a arco com conexão concentrada e fora da linha de centro (SCOTTI, 2008).....	27
Figura 16 - Oscilograma típico de uma transferência por curto-circuito (SCOTTI, 2008).....	28

Figura 17 - Oscilograma típico de uma transferência no modo Globular (SCOTTI, 2008).....	28
Figura 18 - Oscilograma típico de uma transferência no modo Goticular (SCOTTI, 2008).....	29
Figura 19 - Ilustração do comportamento da transferência metálica na passagem pela corrente de transição (SCOTTI, 2008)	30
Figura 20 - Imagens e representação esquemática da transferência rotacional (SCOTTI, 2008).....	30
Figura 21 - Desenho esquemático do processo de soldagem TIG (MODENESI, 2006).....	31
Figura 22 - Comparação entre as tochas TIG (á esquerda) e Plasma (á direita) (REIS, 2007)	32
Figura 23 - Detalhamento esquemático da tocha de soldagem a plasma (REIS, 2007).....	33
Figura 24 - Comparação entre as pressões exercidas nos arcos TIG e Plasma (REIS, 2007)	34
Figura 25 - Perfis típicos de cordões em solda pelos processos TIG e Plasma (REIS, 2007).....	34
Figura 26 - Distribuição de temperatura em planos pelos processos TIG e Plasma (REIS, 2007)	35
Figura 27 - Característica estática do arco (CEA) nos processos TIG e Plasma (REIS, 2007)	35
Figura 28 - Efeito do comprimento do arco sobre a corrente de soldagem para fontes do tipo corrente constante e tensão constante (REIS, 2007).....	36
Figura 29 - Direção do fluxo de elétrons na polaridade direta (REIS, 2007)	37
Figura 30 - Desenho esquemático da pistola de soldagem Plasma-MIG com eletrodo de tungstênio (ESSERS, 1972, apud OLIVEIRA, 2006)	39
Figura 31 - Desenho esquemático da pistola de soldagem Plasma-MIG com eletrodo anular de cobre (ESSERS, 1981, apud OLIVEIRA, 2006)	39
Figura 32 - Seqüência de acendimento do método Soft Start (DRAUGELATES, 2001, apud OLIVEIRA, 2006).....	41
Figura 33 - Distribuição de densidade de potência para o Plasma-MIG (MAKARENKO, 2003).....	43
Figura 34 - Distribuição de densidade de potência para o Plasma-MIG (OLIVEIRA, 2006).....	43

Figura 35 - Temperatura das Gotas em função da corrente através do arame-eletrodo para os processos Plasma-MIG e MIG/MAG. Corrente Plasma = 100 A. Arame-eletrodo: AISi5, 1,6 mm de diâmetro (VAN DER HEUVEL, 1978, apud OLIVEIRA, 2006).	44
Figura 36 - Frequência de Destacamento e Massa das Gotas em função da Corrente através do arame para os processos Plasma-MIG e MIG/MAG em atmosfera de CO ₂ . Arame-Eletrodo: Aço Carbono, diâmetro = 1,2 mm. Corrente Plasma = 100 A (VAN DER HEUVEL, 1978, apud OLIVEIRA, 2006).	45
Figura 37 - Características Tensão x Corrente dos processos Plasma-MIG e MIG convencional (JELMORINI, 1975, apud OLIVEIRA, 2006).	45
Figura 38 - Soldagem Plasma-MIG com pulsação da corrente de MIG (OLIVEIRA, 2006).	46
Figura 39 - Diagrama Esquemático da Característica Estática do Processo Plasma-MIG. I_b = Corrente MIG de Base; I_p = Corrente MIG de Pulso; U_b designa tensão de base e U_p designa tensão de pulso (OLIVEIRA, 2006).	46
Figura 40 - Modelo elétrico para o processo Plasma-MIG (DUTRA, 2007).	47
Figura 41 - Desenho esquemático do processo Plasma-MIG com arco de Plasma e Híbrido (OLIVEIRA, 2006).	47
Figura 42 - Características estáticas do processo Plasma-MIG (OLIVEIRA, 2006) ..	48
Figura 43 - Influência das correntes de MIG e Plasma sobre a tensão MIG (OLIVEIRA, 2006).	49
Figura 44 - Migração do arco Plasma para o bico de contato e arame MIG (OLIVEIRA, 2006)	50
Figura 45 - Instabilidades no arco Plasma causadas por curtos-circuitos arame-eletrodo/peça (OLIVEIRA, 2006).	51
Figura 46 - Oscilograma da corrente e da tensão do processo Plasma-MIG no modo transferência por curto-circuito (BAI, 2010).	52
Figura 47 - Imagem da transferência da gota por curto-circuito Plasma-MIG (BAI, 2010).	52
Figura 48 - Imagem da solda na transferência por curto-circuito pelo processo Plasma-MIG, (a) aparência superficial do cordão, (b) vista da seção transversal (BAI, 2010).	52
Figura 49 - Oscilograma do modo de transferência globular no processo Plasma-MIG (OLIVEIRA, 2006)	53
Figura 50 - Comparação da distribuição de corrente na gota fundida para o processo MIG/MAG e Plasma-MIG (OLIVEIRA, 2006).	53

Figura 51 - Oscilograma do modo de transferência goticular no processo Plasma-MIG (OLIVEIRA, 2006).....	54
Figura 52 - Comparação da velocidade de alimentação do arame pela corrente MIG para os processos MIG/MAG e Plasma-MIG (OLIVEIRA, 2006)	55
Figura 53 – Influência das correntes de plasma e MIG na velocidade de alimentação. Arame AISi-5, 1,6 mm de diâmetro. Argônio como gás MIG, Plasma e de proteção, com vazões de 5, 5 e 10 l/mim. (OLIVEIRA, 2006)	55
Figura 54 - Influência das correntes de plasma sobre o coeficiente linear “b” (OLIVEIRA, 2006)	56
Figura 55 - Influência das correntes de plasma e MIG sobre a velocidade de alimentação utilizando um arame de aço carbono, 1,2 mm de diâmetro e uma mistura de argônio com 4% de CO ₂ como gás MIG (OLIVEIRA, 2006)	57
Figura 56 - Influência do comprimento livre do eletrodo na taxa de fusão do arame para o aço carbono (OLIVEIRA, 2006)	57
Figura 57 - Bancada de realização dos testes do Laboratório de soldagem da UFES	59
Figura 58 - Fonte de Soldagem Plasma-MIG	60
Figura 59 - Unidade de refrigeração.....	61
Figura 60 - Unidade de alimentação do arame e de controle de velocidade.....	62
Figura 61 - Dispositivo de deslocamento da tocha.....	62
Figura 62 - Pistola Plasma-MIG	63
Figura 63 – Detalhe interno da Pistola	63
Figura 64 - Soldas realizadas com os parâmetros do teste 1	65
Figura 65 - Comparação entre a largura do cordão das soldas com os parâmetros do teste 1 e teste 2.....	65
Figura 66 - Comparação entre a largura do cordão das soldas do teste 1 e teste 2 ..	66
Figura 67 - Cordão de solda realizado com os parâmetro do teste 3.....	66

SIMBOLOGIA

A	área da seção transversal
A_{cep}	área de contato entre o eletrodo e o arco de plasma
Ar	argônio
B	intensidade do fluxo magnético
CEA	característica estática do arco
CEF	característica estática da fonte
Cu	cobre
CO	monóxido de carbono
CO_2	dióxido de carbono
d_a	diâmetro do arame-eletrodo
d_g	diâmetro da gota
F_a	força de arraste provocada pelo fluxo de plasma
F_{em}	força eletromagnética
F_g	força causada pela aceleração da gravidade
F_γ	força causada pela tensão superficial
F_v	força de vaporização
He	hélio
H_2	hidrogênio
I	corrente
I_{MIG}	corrente que circula pelo circuito MIG
I_{PL}	corrente que circula pelo circuito Plasma
I_{tr}	corrente de transferência
J	densidade de corrente
L_{cep}	comprimento do contato eletrodo com o arco de plasma
L_e	comprimento livre do arame-eletrodo
MAG	metal active gas
MIG	metal inert gás
Mn	manganês
N_2	nitrogênio
O_2	oxigênio
P_{fem}	pressão devido à força eletromagnética

q	densidade de fluxo de calor
r	raio
R	resistência ôhmica
R_h	resistência do arco híbrido
R_{MIG}	resistência do circuito MIG
R_t	resistência total do circuito
t	tempo
TIG	tungsten inert gas
U	tensão
U_{MIG}	tensão MIG
U_{PL}	tensão Plasma
V_a	velocidade de alimentação
V_s	velocidade de soldagem
ZTA	zona termicamente afetada
ρ	densidade
γ	energia de superfície
μ	permeabilidade magnética

RESUMO

O processo de Soldagem Plasma-MIG se apresenta como uma alternativa para o ganho de qualidade e produtividade na indústria. Com a aquisição desse equipamento para o Laboratório de Soldagem da Universidade Federal do Espírito Santo teve-se a necessidade de um acompanhamento detalhado, tanto para o recebimento quanto para o seu perfeito uso. Para que o processo de condicionamento e comissionamento fossem realizados adequadamente, este trabalho apoiou-se em uma extensa literatura, para proporcionar solidez ao entendimento desse processo, por ser um dos mais novos processos de soldagem implementados. Ensaio foram realizados para atestar o funcionamento do equipamento e a qualidade do produto. Foram feitos testes para comparar a influência da corrente de plasma na soldagem e verificar como é afetado geometricamente o cordão de solda. O processo obteve uma alta produção com soldas livres de respingos e com boa aparência superficial.

Palavras-chave: Soldagem; Plasma-MIG; Arco Híbrido.

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento da indústria Brasileira, sobretudo devido à exploração de petróleo, tornou-se cada vez mais necessário o desenvolvimento de novos equipamentos e processos para atender a essa demanda crescente e exigente. A soldagem tem seu espaço bem definido nesse contexto. Seu desenvolvimento afeta diretamente a indústria, que busca cada vez mais qualidade, produção e produtividade, além de segurança.

Os processos de soldagem a arco voltaico vêm sendo estudados há mais de um século. Assim, o processo de soldagem híbrido Plasma-MIG, surgiu com o intuito de ampliar o campo da soldagem, aumentando, melhorando e flexibilizando a sua região de trabalho.

O processo de soldagem Plasma-MIG tenta unir as qualidades dos processos com eletrodo não consumível (Plasma), que tem bom controle da geometria do cordão de solda, com as do processo de eletrodo consumível (MIG/MAG) que tem alta taxa de produção.

De olho nessa demanda e pela procura de melhores resultados, o Laboratório de Soldagem da UFES adquiriu uma bancada de soldagem Plasma-MIG para auxiliar no conhecimento técnico-científico deste processo no país e assim ajudar a difundir o seu uso na indústria nacional, já que seu uso é ainda restrito a países desenvolvidos, devido ao pouco conhecimento do processo no Brasil.

1.1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é a adequação do processo de soldagem híbrido Plasma-MIG no Laboratório de soldagem da UFES. As etapas de condicionamento e comissionamento são fundamentais para validar e confirmar o que foi dito na literatura sobre o processo e assim servir de base para os trabalhos futuros no laboratório.

O estudo do processo de soldagem Plasma-MIG possibilitará melhor familiarização dos parâmetros e entendimento do processo, acrescentando mais uma alternativa para a melhora da produção ou até como saída para problemas considerados sem

solução. Abrindo as portas para que o processo de soldagem Plasma-MIG possa encontrar seu nicho, nesse crescente mercado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DO PROCESSO

Operações de soldagem causam alterações localizadas e bruscas de temperatura no material soldado, devido à alta concentração de energia em uma pequena região. Estas alterações, por sua vez, podem provocar mudanças estruturais e, conseqüentemente, nas propriedades do material. Em geral, estas alterações se dão na forma de uma degradação nas propriedades, o que pode ter importantes implicações na utilização da peça soldada. Existem duas maneiras de se enfrentar este problema. A primeira é desenvolver materiais que sejam menos sensíveis à soldagem, isto é, melhorar a "soldabilidade" dos materiais. A segunda é controlar a operação de soldagem (e, possivelmente, executar operações complementares) de modo a minimizar, ou remover, a degradação de propriedades da peça (MODENESI, 2006).

Ambos os meios, metalúrgicos ou de controle do processo, também são utilizados para se obter um ganho na velocidade e na diminuição de respingos, aumentando a produtividade e a qualidade superficial da peça soldada, diminuindo assim o tempo dos processos subseqüentes de acabamento.

2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG

MIG/MAG é um processo da soldagem que se baseia na fonte de calor de um arco voltaico elétrico mantido entre a extremidade de um arame nu consumível, alimentado continuamente, e a peça a se soldar (Figura 1).

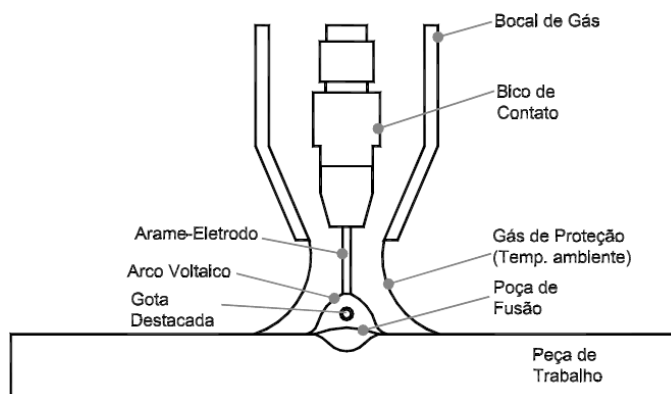


Figura 1 - Desenho esquemático do processo de soldagem MIG/MAG (OLIVEIRA, 2006)

A proteção é feita por um gás que pode ser inerte (Ar ou He) ou um gás ativo (CO_2 , O_2 e N_2) ou ainda a combinação desses gases, do qual escoam por um bocal, conferindo além da proteção atmosférica, melhor estabilidade, facilitando a transferência metálica. Devido a esse efeito protetor é chamado de gás de proteção. Vazões típicas para o gás de proteção estão entre 10 a 16 l/min, devendo-se estar ciente que em baixas vazões pode ocorrer falta de proteção e vazões muito altas gerar turbulência possibilitando a inclusão de elementos contaminantes (SCOTTI, 2008).

O processo MIG/MAG pode ser aplicado de forma automática, quando o movimento da tocha é feito por uma máquina, ou semi-automática, quando a tocha é conduzida manualmente pelo operador (SCOTTI, 2008).

Este processo se destaca pela sua elevada taxa de fusão do arame e a possibilidade de variação de modos de transferência metálica. O pequeno comprimento do eletrodo (extensão energizada do arame eletrodo) permite o uso de uma alta densidade de corrente (levando a um alto consumo) sem afetar a rigidez mecânica do eletrodo por aquecimento ao longo de seu comprimento. Estas são as principais razões de se creditar ao processo MIG/MAG uma alta capacidade de produção (SCOTTI, 2008).

Devido à sua alimentação de arame contínua, possibilita aumentar o ciclo de trabalho, que é a relação entre o tempo de arco aberto e o tempo total de soldagem (maior produtividade). A possibilidade de se trabalhar em diversos modos de transferências permite soldar em qualquer posição (SCOTTI, 2008; MODENESI, 2006).

2.1.1 Características dos gases no processo de Soldagem MIG/MAG

A escolha do tipo do gás deve ser bem analisada, pois, influencia diretamente na qualidade da solda. Uma delas é a proteção contra elementos atmosféricos nocivos à solda. Exemplo disso é a fragilização por hidrogênio e a formação de poros nos aços devido à formação de bolhas de CO e CO_2 oriundas da grande reatividade do carbono com o oxigênio (SCOTTI, 2008).

Gases inertes são usados e materiais reativos para evitar a oxidação. Já os ativos, que podem ser puros ou uma mistura com gases inertes, são utilizados devido à possibilidade de se controlar a fusão de acordo com a quantidade de cada gás na mistura (SCOTTI, 2008).

As propriedades físicas são de muita importância, a exemplo a densidade do gás. Quando o gás é mais denso, como o Ar (ou a maioria das misturas a base de Ar) tem-se maior facilidade de proteger a solda na posição plana, já as misturas a base de He (que é menos denso que o ar atmosférico) facilitam a soldagem sobrecabeça. Outras propriedades importantes são o potencial de ionização e a condutividade térmica do gás.

O primeiro é a energia necessária para ionizar o gás, para um mesmo comprimento de arco e uma mesma corrente. A tensão é maior para o He (que tem maior potencial de ionização) quando comparado ao Ar. A condutividade térmica é a capacidade de conduzir calor. A alta capacidade de troca térmica de gases como He, CO_2 e H_2 favorece a eficiência de fusão. A Figura 2 mostra a variação da geometria do cordão com a utilização de gases ou misturas com maior capacidade de troca térmica. É visto que, com a adição desses gases o cordão perde a forma típica de cálice encontrada na soldagem com argônio puro, isso acontece devido à parcela de calor transferido por condução para o metal de base se tornar mais significativa (SCOTTI, 2008).

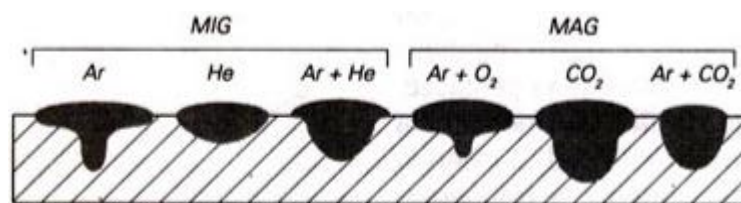


Figura 2 - Efeito dos gases sobre a penetração (WWW.OXIBRAS.COM.BR, acesso em 28 de maio 2011)

A adição de O_2 no argônio melhora a molhabilidade pela diminuição da tensão superficial, e facilita a emissão por campo melhorando a estabilidade, porém, por se tratar de um gás oxidante, sua quantidade nunca passa de 5% para evitar a oxidação excessiva em materiais reativos (SCOTTI, 2008).

2.1.2 Características do arco e da fonte no processo de Soldagem MIG/MAG

Entre a ponta do eletrodo e o metal de base existe uma região denominada plasmática, por onde passa uma grande quantidade de corrente, produzindo grande quantidade de calor e luz. A essa região se dá o nome de arco voltaico. Na soldagem MIG/MAG a passagem de corrente se dá por polaridade reversa (os elétrons se deslocam do metal de base para o eletrodo). Esses elétrons são emitidos devido a um fenômeno denominado emissão catódica. Esses “bombardeamentos” de elétrons no eletrodo (anodo) gera um maior aquecimento nessa região facilitando a fusão do arame. Essa configuração permite uma maior penetração na soldagem MIG/MAG (SCOTTI, 2008).

Outra vantagem da polaridade reversa é o fenômeno chamado de limpeza catódica. Pontos catódicos são pontos de emissão de elétrons que geram intensa luminosidade e tem vida curta. Eles aparecem sobre os óxidos na superfície do metal de base e os removem perdendo a condição de existir com a passagem da corrente. Novos pontos são criados momentaneamente sobre outros óxidos, ocorrendo a limpeza catódica (REIS, 2007) .

Outras importantíssimas propriedades do processo são as características estáticas do arco (CEA) e características estáticas da fonte (CEF). A CEA é a relação da tensão requerida para uma dada condição de soldagem em função da corrente, ou seja, representa o comportamento característico de um determinado arco. Cada arco, em função de seu comprimento, material, dimensão do eletrodo, da proteção e da polaridade, tem uma única CEA. A Figura 3 mostra a mudança da curva da CEA com a variação do comprimento do arco.

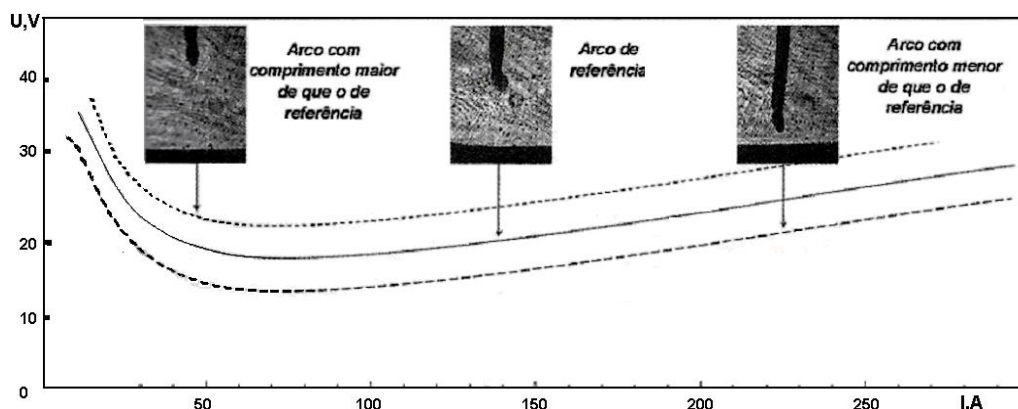


Figura 3 - Desenho esquemático da CEA para diferentes comprimentos de arco (SCOTTI, 2008)

Também é visto na Figura 3, que a parte inicial da curva é descendente, pois, quando a corrente é muita baixa, há poucos choques para manter o equilíbrio ionização/desionização, devendo cada elétron possuir maior energia cinética nos choques (tensão). Isso faz com que não se tenha um arco estável a baixas correntes no processo MIG/MAG (SCOTTI, 2008).

Já a CEF é determinada pelo equipamento. A fonte recebe energia elétrica da rede e a converte de sua forma de alta tensão e baixa corrente na qual ocorre menores perdas na linha, para baixa tensão e alta corrente (necessita-se de correntes mais altas para se fundir o metal, e também é mais seguro de se trabalhar em tensões mais baixas). As formas de CEF dependem dos tipos de fontes, que podem ser definidas das seguintes formas (Figura 4).

Fonte de corrente constante: é aquela que permite a regulação da corrente de trabalho e que tem uma curva de CEF que tende a produzir uma corrente de trabalho relativamente constante. Este tipo de fonte é mais complexa de ser utilizada devido à necessidade de um controle externo, pois o arco trabalha em um regime metaestável, não conseguindo voltar às condições iniciais quando afetado por perturbações.

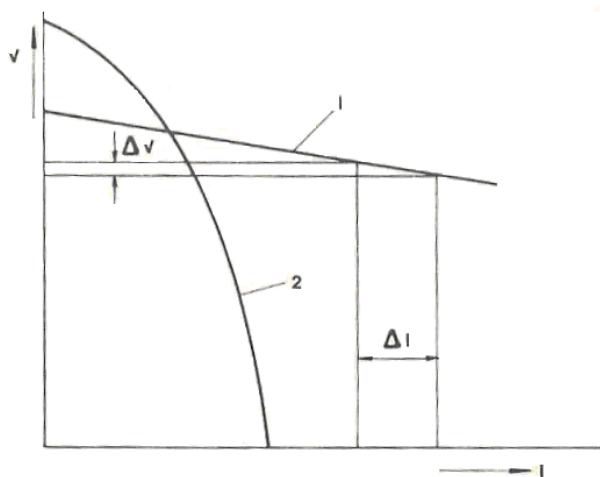


Figura 4 - Característica estática de duas diferentes fontes de energia para soldagem. 1 - Tipo tensão constante; 2 - Tipo corrente constante (QUITES, 1979)

Fonte de tensão constante: é aquela que permite a regulação de tensão de trabalho e tem uma curva de CEF que tende a produzir uma tensão relativamente constante. Tipo mais comumente usado por possuir um controle interno, fazendo uma auto-regulagem.

A Figura 5 mostra o ponto de trabalho para os dois tipos de fontes, com diferentes comprimentos de arco.

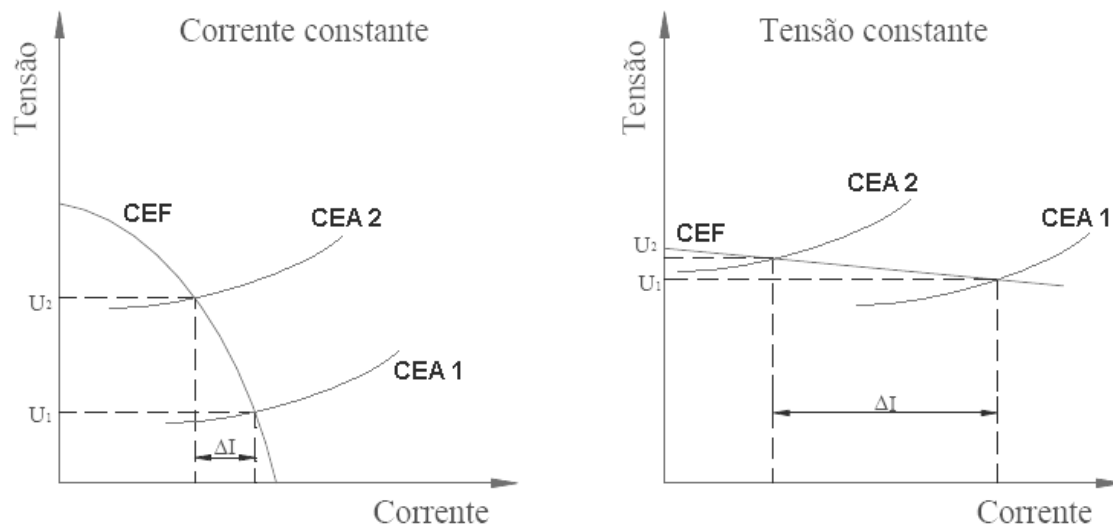


Figura 5 - Representação esquemática do ponto de trabalho em fontes do tipo corrente constante (à esquerda) e tensão constante (à direita). A CEA 2 representam arcos de maior comprimento do que os da CEA 1 (MATERIAL DE AULA, 2011)

2.1.3 Forças governantes da transferência metálica no processo de Soldagem MIG/MAG

O tipo de transferência metálica é determinado por um jogo de equilíbrio de forças na gota, forças essas que, tanto podem ajudar como dificultar a transferência. Elas são influenciadas dentre outros fatos, pelo material e diâmetro do eletrodo, pelo gás de proteção, pela intensidade e polaridade da corrente de soldagem, pelo comprimento do arco e pela pressão ambiente (SCOTTI, 2008).

A gota é transferida quando o somatório das forças de destacamento for maior que o somatório das forças de retenção. No caso as principais forças que agem sobre a gota são: força gravitacional (F_g), força eletromagnética (F_{em}), força devido à tensão superficial do metal fundido (F_γ), força de arraste dos gases (F_a) e força de vaporização (F_v) (Figura 6). O mecanismo de destacamento se altera, quando a corrente alcança um valor chamado corrente de transição (SCOTTI, 2008).

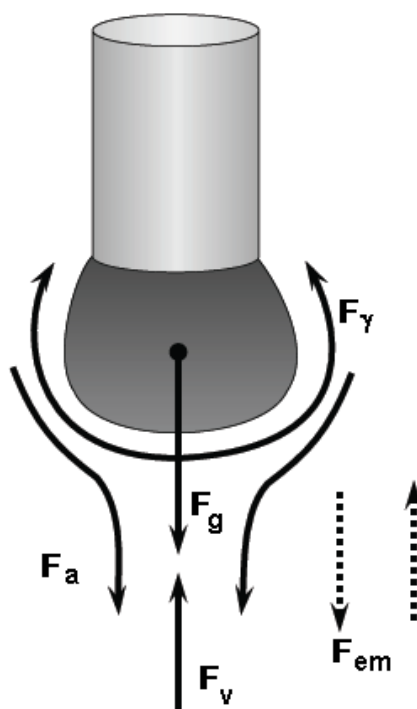


Figura 6 - Forças governantes no processo MIG/MAG (SCOTTI, 2008).

Força gravitacional (F_g): É a força originada pela gravidade, e por depender da massa, é governada pela densidade do metal líquido (ρ) e diâmetro da gota (d_g), Equação 1. Assumindo que a gota tem uma forma esférica, a intensidade de sua atuação é condicionada ao seu volume (g é a gravidade) (SCOTTI, 2008).

$$F_g = \frac{\pi \cdot \rho \cdot g \cdot d_g^3}{6}$$

Equação 1

A força da gravidade pode atuar a favor ou contra a transferência, dependendo da posição de soldagem de acordo com a Figura 7. No caso em que a solda é realizada na posição plana (eletrodo a 0°) até a posição que o eletrodo fique em um plano horizontal (eletrodo a 90°), a força da gravidade atua no sentido do destacamento da gota. Já quando o eletrodo estiver em uma posição entre 90° a 180° (até sobrecabeça) ele atua forçando a gota contra o eletrodo. Outro detalhe é que a força gravitacional continua agindo mesmo após a gota se destacar do eletrodo (SCOTTI, 2008).

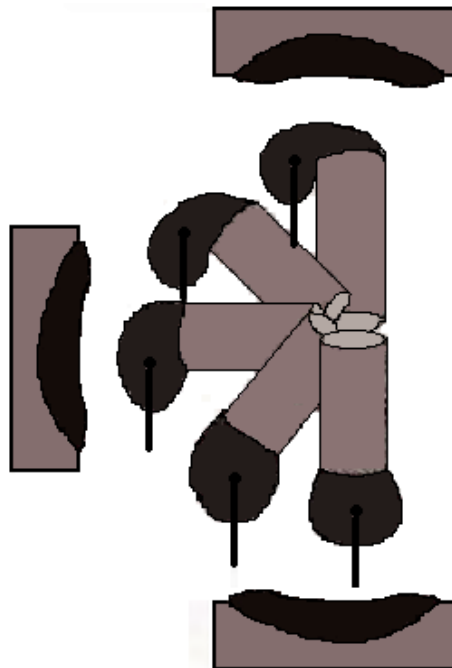


Figura 7 - Ilustração da ação da força gravitacional (SCOTTI, 2008).

Força associada à tensão superficial (F_γ): dentro de um líquido, a força resultante de cada átomo é pequena ou nula. Mas na superfície, a resultante de atração é para o interior, pois a densidade molecular é maior dentro de um líquido do que num gás ou plasma. A gota em desenvolvimento tem sua área superficial em crescimento, isso demandará uma energia para criar essa nova área. Essa energia chama-se energia de superfície (γ cujas unidades são J/m²). Como essa força é relativa à área gerada ela depende do diâmetro da gota (d_g) pela Equação 2 (SCOTTI, 2008).

$$F_\gamma = \pi \cdot d_g \cdot \gamma$$

Equação 2

Essa força devida à tensão superficial cresceria infinitamente se não fosse a força gravitacional. Com o eletrodo trabalhando na posição plana, com o crescimento da gota, o diâmetro da mesma aumenta. Com isso há uma competição entre a força gravitacional (que aumenta em d_g^3) e a força devida à tensão superficial que aumenta linearmente com o diâmetro (Figura 8). A gota ficará no eletrodo até atingir um diâmetro crítico, que é quando a força da gravidade passa a força devida à tensão superficial (SCOTTI, 2008).

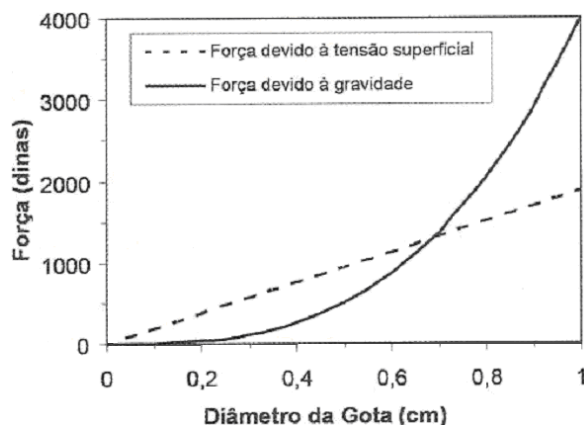


Figura 8 - Ilustração do crescimento competitivo entre as forças gravitacional e a força devido a tensão superficial (SCOTTI, 2008).

Pode acontecer também de a força devido à tensão superficial ajudar na transferência. Isso acontece quando há uma redução no comprimento do arco e a gota toca a poça de fusão. Isso diminui a energia livre de superfície e faz com que a gota seja puxada para a poça (Figura 9) (SCOTTI, 2008).

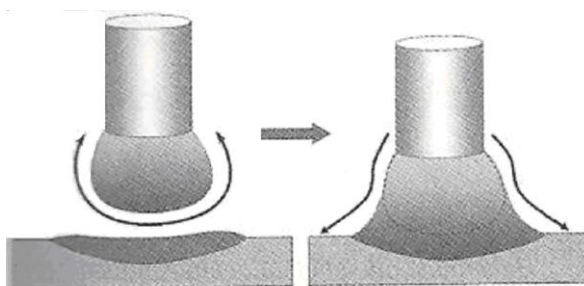


Figura 9 - Mudança na direção de atuação da força devido a tensão superficial, quando a gota toca a poça (SCOTTI, 2008).

Força eletromagnética (F_{em}): Como já é sabido um condutor elétrico gera um campo magnético ao seu redor (a intensidade do fluxo é representada por B), que induz forças radiais (F_{em}) no sentido do centro do condutor (Figura 10). Quanto maior a corrente, maiores são essas forças denominadas de *Forças de Lorentz*, ($f_{em} = \mu(\mathbf{J} \times \mathbf{B})$, onde μ é a permeabilidade magnética do material condutor e $\mathbf{J}$ a densidade de corrente). Para condutores sólidos essa força pode ser desconsiderada, mas para um condutor líquido (como a gota metálica) sofre grande influência, pois, tenta deslocar a gota no sentido da superfície para o centro do condutor.

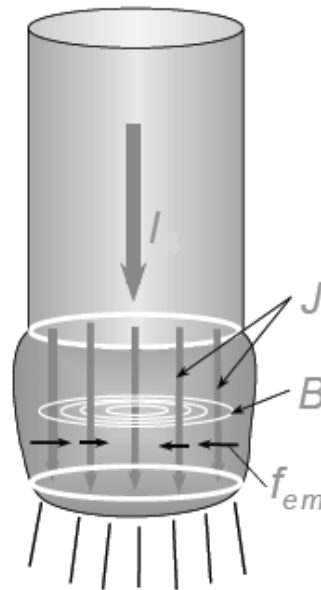


Figura 10 - Fenômeno da geração das forças eletromagnéticas na gota de metal líquido de forma cilíndrica (SCOTTI, 2008).

Pela Equação 3 vemos que a pressão devido à força eletromagnética (P_{fem}) depende do raio do condutor (R) e da posição do plano que se está medindo (r), ou seja, para seções transversais muito grandes a pressão é menor. No centro da seção ($r=0$) a pressão é máxima.

$$P_{fem}(r) = \frac{\mu \cdot I^2}{4\pi^2 \cdot R^2} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)$$

Equação 3

Há dois momentos de influência da F_{em} sobre a gota, inicialmente na sua formação e no processo de destacamento.

A direção da força depende da intensidade da corrente. Quando a corrente é alta, há mais concentração de fluxo de corrente na parte superior da gota ($R_2 > R_1$) (Figura 11), fazendo com que a maior pressão se dê nesta região, impulsionando o volume de crescimento no sentido de destacamento. Porém, no caso de a corrente ser baixa, a maior concentração se dá na parte de baixo da gota ($R_4 < R_3$), fazendo com que a força seja exercida contra o arame-eletródo.

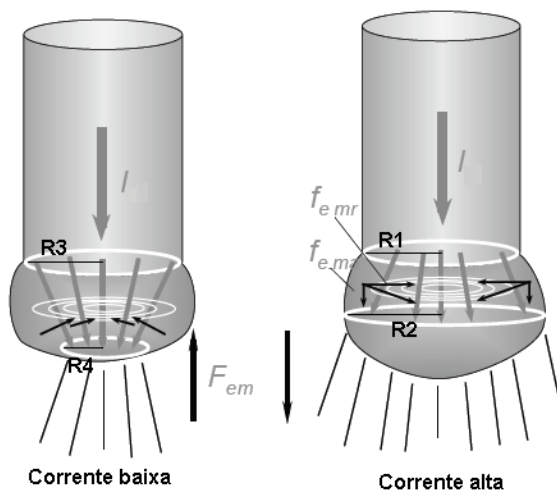


Figura 11 - Ilustração da direção do movimento da gota devido á força eletromagnética (SCOTTI, 2008).

O efeito magnético vai além de apenas direcionar o fluxo de crescimento da gota. Quando a gota alcança um volume próximo ao do seu diâmetro crítico, começa-se a formar um empescoçamento da gota no acoplamento do arame (Figura 12). Há uma redução da seção transversal próximo ao arame e um crescimento da densidade de corrente de forma abrupta, fazendo grande pressão nessa área. Como resultado a gota é impulsionada para frente favorecendo seu destacamento (OLIVEIRA, 2006).

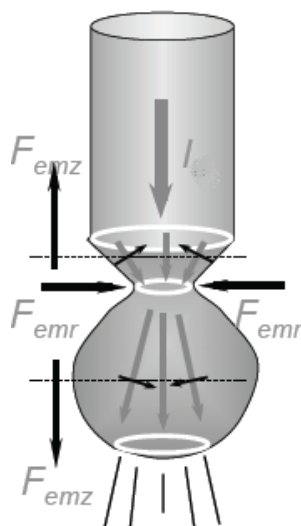


Figura 12 - Ilustração do processo de empescoçamento (SCOTTI, 2008).

Força de arraste (F_a): esse tipo de força é originada pelo jato de plasma em contato com a gota. Na Figura 13 é visto que depressões são geradas sob a gota por questões aerodinâmicas, F_a sempre contribui no sentido do destacamento da gota.

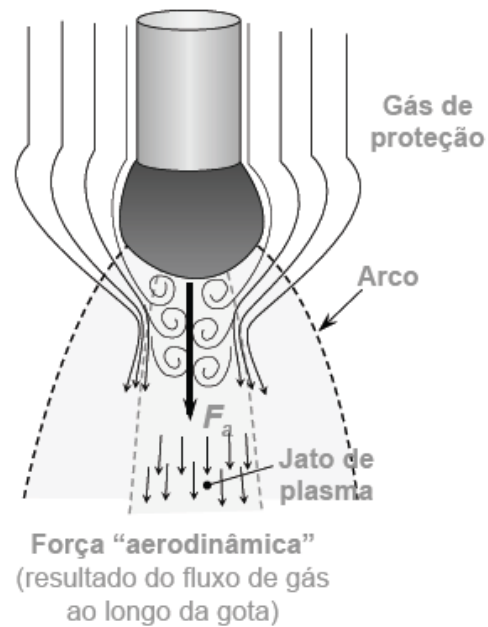


Figura 13 - Ilustração do fenômeno da geração da força de arraste pelo fluxo de gás na gota (SCOTTI, 2008).

Força de reação por vaporização (F_v): essa força é originada pela evaporação dos componentes metálicos do arame-eletrodo na região do acoplamento do arco com a gota (Figura 14). Esta conexão origina muito calor, acarretando geração de vapores metálicos. A ação dessa força é de quatro a cinco vezes menor na polaridade positiva do que na polaridade negativa.

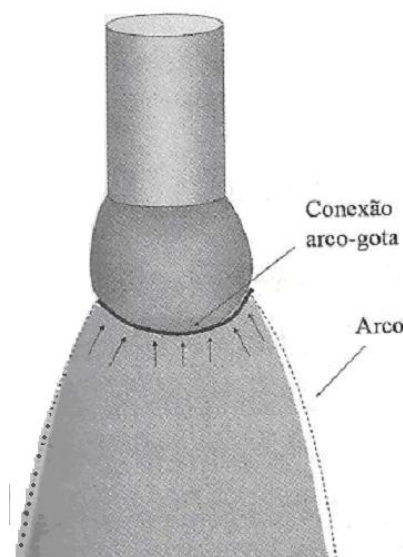


Figura 14 - Efeito da força de reação por evaporação sobre a transferência metálica (SCOTTI, 2008).

Se o núcleo de condução do arco ficar reduzido devido ao tipo de gás selecionado, esse fato pode localizar demasiadamente a força de reação e, se a mesma se der fora da linha de centro da gota, pode desviá-la de sua trajetória normal (Figura 15). Após a gota ser desviada, os jatos do plasma repelidos da peça podem mantê-la fora da posição por longos períodos, fazendo com que se tornem gotas de grande volume. Essa repulsão facilita a geração de respingos na soldagem.

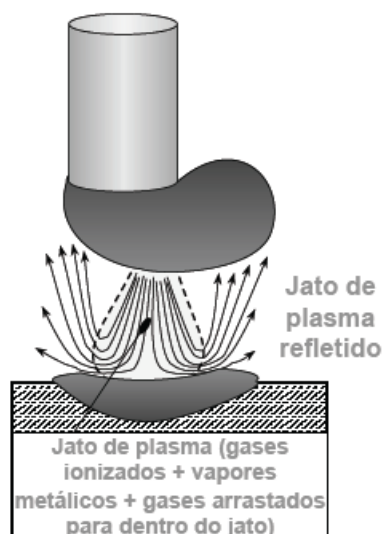


Figura 15 - Desvio da gota devido a arco com conexão concentrada e fora da linha de centro (SCOTTI, 2008).

2.1.4 Modos de transferência metálica no processo de soldagem MIG/MAG

Scotti classificou alguns tipos de transferência metálica no processo MIG/MAG, dos quais os principais serão citadas á seguir: Curto-Circuito, Globular, Goticular e Rotacional.

a) Transferência por Curto-Circuito

Na transferência por curto-circuito uma gota de metal fundido é formada no fim do eletrodo. Quando ela se torna suficientemente grande para entrar em contato com a poça de fusão, o arco sofre um curto-circuito. Isto eleva a corrente de soldagem e a corrente é liberada, permitindo que o arco seja ignitado novamente. O aumento da corrente causado pelo curto-circuito gera respingos (Figura 16). Esse tipo de transferência ocorre geralmente em correntes e tensões baixas.

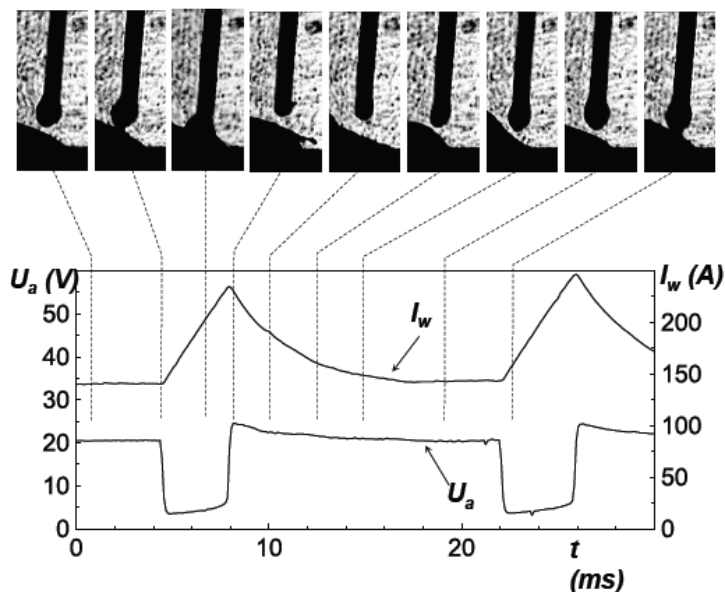


Figura 16 - Oscilograma típico de uma transferência por curto-circuito (SCOTTI, 2008)

b) Transferência Globular

Esse tipo de transferência ocorre quando se utiliza uma alta tensão (arcos longos que impossibilita o curto-circuito) e baixa corrente (forças eletromagnéticas são desprezíveis ou não favorecem o destacamento). Caracteriza-se principalmente pela formação de gota irregular com diâmetros maiores que o diâmetro do eletrodo e em baixa frequência (1 a 10 gotas/segundo) (Figura 17). As características dinâmicas do modo de transferência Globular têm um sinal bem característico.

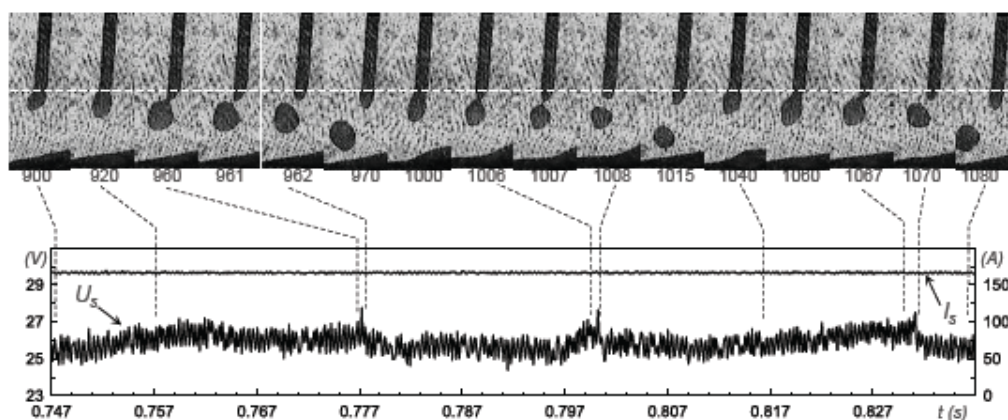


Figura 17 - Oscilograma típico de uma transferência no modo Globular (SCOTTI, 2008)

O tamanho, a forma e a posição da gota, assim como a frequência de transferência, dependem, principalmente, do diâmetro e composição do arame-eletrodo, do gás de proteção e da intensidade da corrente. A gota permanece no arame devido,

principalmente, à ação das forças de tensão superficial e de vaporização, até que o volume da gota se torne suficientemente grande. Com o seu peso maior a gota se destaca devido à força gravitacional.

Devido à baixa corrente, esse tipo de transferência tem uma baixa taxa de produção. Outro fator negativo a este tipo de transferência é que, por ser governada principalmente pela força gravitacional ela é limitada à posição de soldagem plana.

c) Transferência Goticular

Também conhecida como transferência “*Spray*”, sua característica é de gotas de pequeno diâmetro (com diâmetro próximo do eletrodo) e com alta frequência de destacamento. Por isso o oscilograma não mostra variações significativas no sinal (Figura 18).

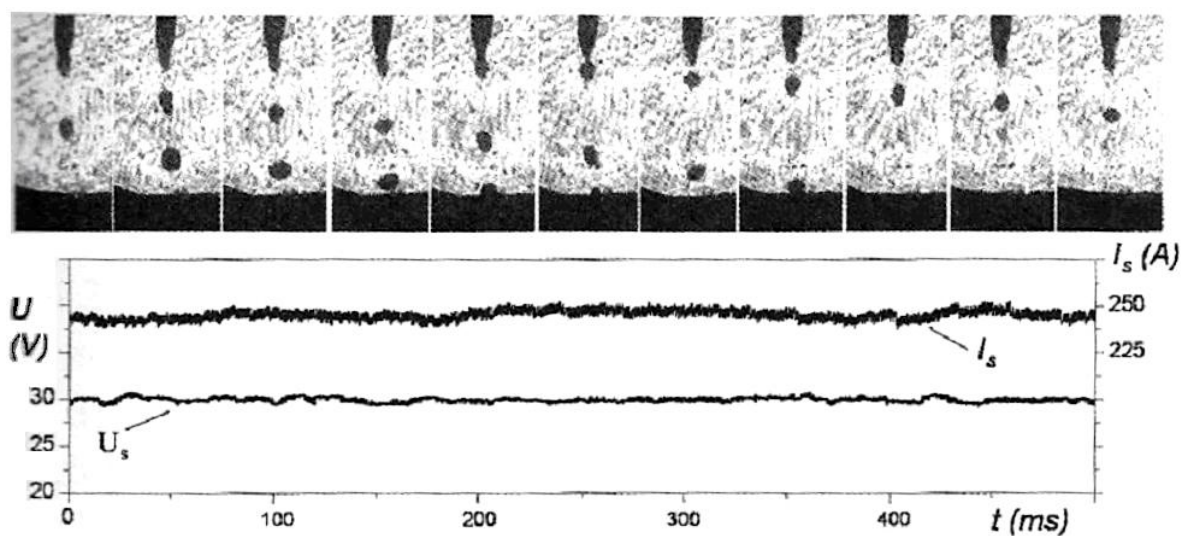


Figura 18 - Oscilograma típico de uma transferência no modo Goticular (SCOTTI, 2008)

Ocorre normalmente na soldagem MIG/MAG com polaridade positiva, com altas correntes (altas forças eletromagnéticas que facilitam o destacamento) e tensões elevadas (para garantir arcos longos) e em atmosfera de argônio.

Uma condição indispensável para esse tipo de transferência é que a corrente ultrapasse a corrente de transição (I_{tr}). Essa corrente de transição não é um valor único, mas sim uma faixa, quando a corrente ultrapassa esse valor a gota tem uma queda abrupta de massa e um crescimento súbito da frequência de destacamento (Figura 19).

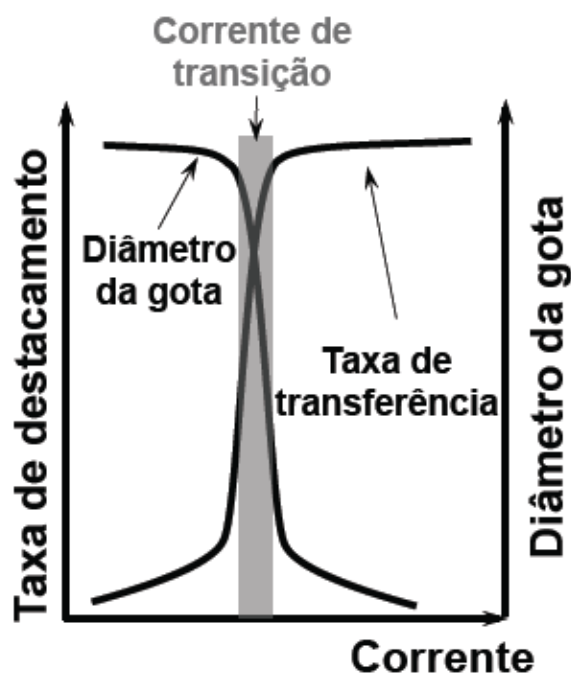


Figura 19 - Ilustração do comportamento da transferência metálica na passagem pela corrente de transição (SCOTTI, 2008)

d) Transferência Metálica Rotacional

Acontece em correntes maiores que as da transferência goticular. A extremidade do eletrodo fica aquecida gerando uma coluna de metal pastoso na ponta do eletrodo. O campo magnético, criado pela alta corrente, é capaz de gerar um efeito torsional no alongamento do eletrodo, de maneira que sua base passa a realizar um movimento rotacional em forma de cone ou mesmo espiral, provocando grande quantidade de respingos (Figura 10).

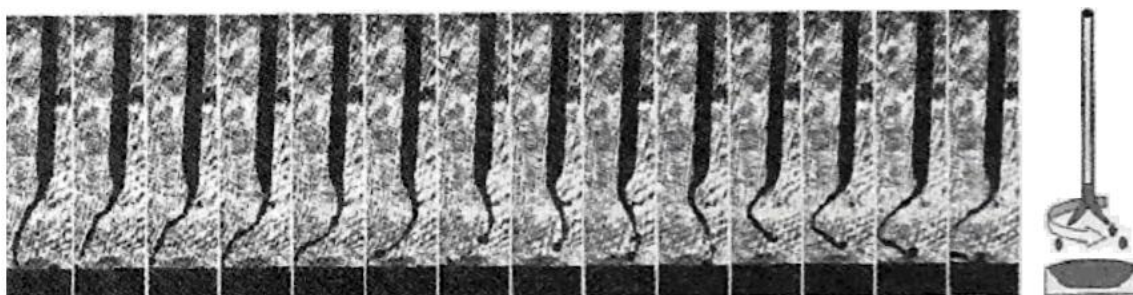


Figura 20 - Imagens e representação esquemática da transferência rotacional (SCOTTI, 2008)

2.2 PROCESSO DE SOLDAGEM A PLASMA

Segundo alguns autores (REIS, 2007) como uma evolução da soldagem TIG, a soldagem a Plasma se assemelha a esta devido à existência de um eletrodo não consumível de tungstênio concêntrico ao bocal.

2.2.1 Princípios da soldagem TIG

Modenesi (MODENESI, 2006) define o processo de soldagem TIG (Tungsten Inert Gas) como um processo no qual a coalescência dos metais é obtida pelo aquecimento destes por um arco estabelecido entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a peça. A proteção do eletrodo e da zona da solda é feita por um gás inerte, normalmente o argônio, ou mistura de gases inertes (Ar e He). Metal de adição pode ser utilizado ou não (Figura 21).

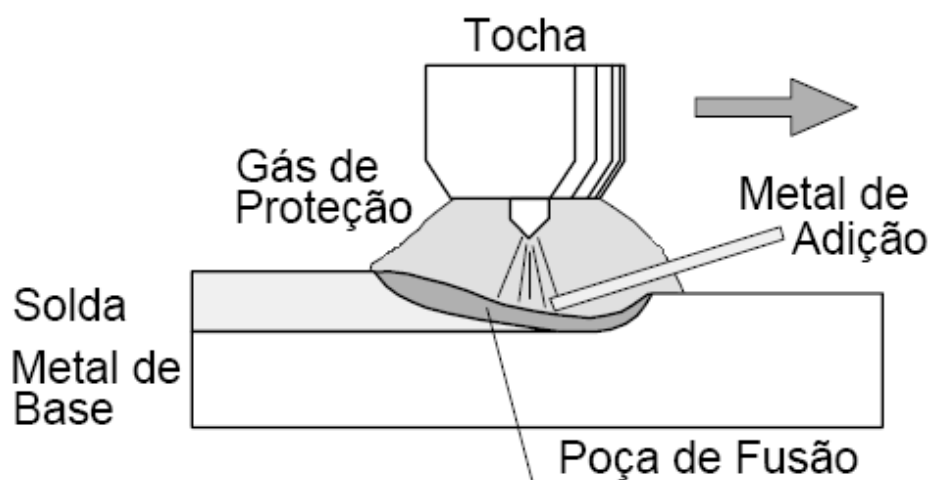


Figura 21 - Desenho esquemático do processo de soldagem TIG (MODENESI, 2006)

A soldagem pode ser manual ou automática. O processo tem um bom controle do arco e da geometria do cordão. Por ter um eletrodo de tungstênio que tem boas características térmicas, é possível utilizar eletrodos de pequeno diâmetro e com isso concentrar mais o arco.

Para esse processo é utilizada uma fonte do tipo corrente constante com polaridade direta (eletrodo negativo), para evitar o aquecimento excessivo do eletrodo.

2.2.2 Características da soldagem a Plasma

Baseados no processo TIG pesquisadores tentavam restringir o arco para poder concentrar melhor o calor e melhorar a eficiência térmica. Assim, em 1953 Robert MacCornack Gage criou a primeira patente deste processo e mostrou a sua funcionalidade. Ele verificou um aumento significativo da concentração de energia fornecida ao arco, além da possibilidade de se trabalhar com comprimentos de arco relativamente mais longos (Figura 22) (REIS, 2007).

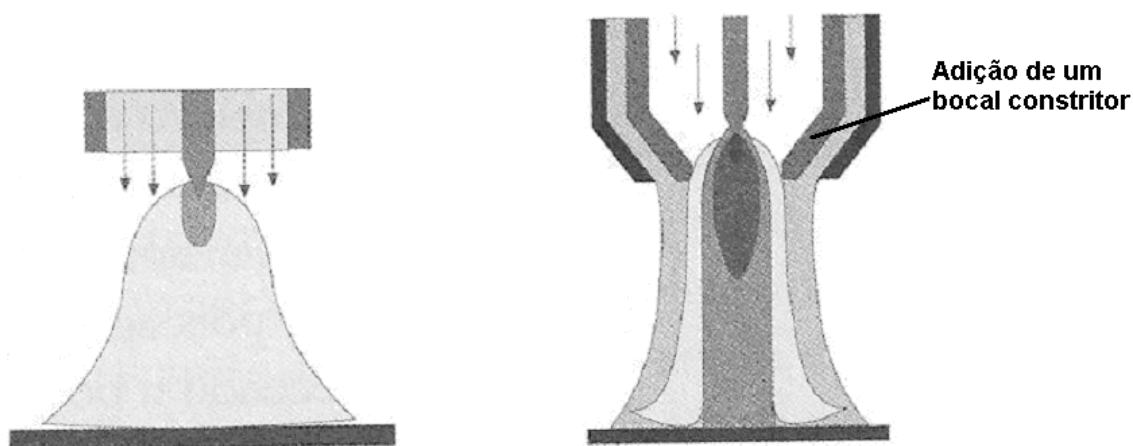


Figura 22 - Comparação entre as tochas TIG (à esquerda) e Plasma (à direita) (REIS, 2007)

Segundo Reis (REIS, 2007) a formação do arco de plasma se dá seguinte forma: um fluxo de gás a baixa vazão (denominado gás de plasma) é direcionado continuamente pelo interior da tocha, fluindo por uma cavidade na qual um eletrodo refratário não consumível (normalmente tungstênio) é concentricamente posicionado. Ao final dessa cavidade existe um bocal com um furo de diâmetro menor que o da cavidade, que restringe a saída do gás. Ainda dentro da cavidade, o gás é aquecido pelo intenso calor gerado por arco, previamente aberto, denominado arco piloto, que é gerado entre o eletrodo e o bocal de constrição. Esse aquecimento ioniza o gás, facilitando a abertura do arco entre o eletrodo e a peça, denominado arco principal. Após a abertura do arco principal o arco piloto pode ser apagado ou não, como normalmente ele só é utilizado para auxiliar a abertura do arco principal e não interfere na soldagem, é deixado aceso para evitar a utilização do ignitor de alta frequência nos seus reacendimentos (Figura 23).

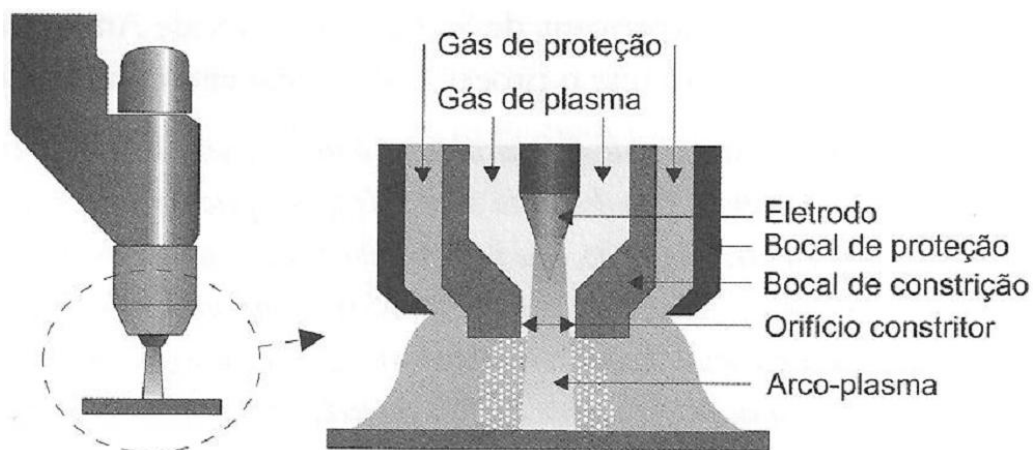


Figura 23 - Detalhamento esquemático da tocha de soldagem a plasma (REIS, 2007)

As pressões, devido à constrição e a expansão térmica pela ionização do gás, fazem com que o plasma seja expelido da tocha a altas velocidades (jato de plasma), atingindo níveis supersônicos. À medida que o plasma passa pelo bocal de constrição o arco-plasma é colimado de tal forma que o calor fique concentrado em uma área relativamente pequena na peça a se soldar. Como o gás de plasma colimado é incapaz de fornecer proteção adequada à poça de fusão contra contaminações atmosféricas, essa proteção é feita por outro gás chamado de gás de proteção que se dá de forma concêntrica e externa ao gás de plasma (REIS, 2007).

Como o eletrodo fica interno ao bocal, o acendimento do arco é feito por um arco piloto entre o eletrodo de tungstênio e o bocal de constrição. Este arco piloto é aberto por um ignitor de alta frequência, facilitando a passagem de corrente pelo ar. Quando aberto, o arco piloto ioniza o gás facilitando a abertura do arco principal. Como o arco piloto é gerado pelo eletrodo e o bocal de constrição, não há necessidade de o metal de base ser condutor de eletricidade. Isso permite a soldagem de materiais mal ou mesmo não condutores, já que a interação fica restrita a energia térmica devido ao gás ionizado e a energia mecânica do jato de plasma (REIS, 2007).

As pressões alcançadas pela constrição do gás, fazem com que a pressão do arco de plasma seja de 6 até 10 vezes maior do que as alcançadas pelo processo TIG, como mostra a Figura 24. Além do mais, a redução da área de incidência do arco sobre a peça obtida por um arco contrito, faz com que a concentração de energia seja aumentada em até 3 vezes (REIS, 2007).

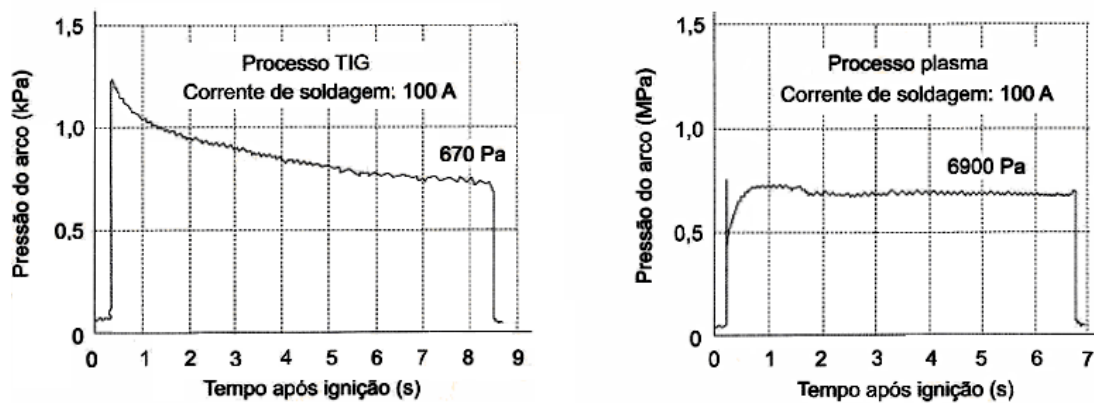


Figura 24 - Comparação entre as pressões exercidas nos arcos TIG e Plasma (REIS, 2007)

Consequente a isso, há um acúmulo de energia cinética, resultando num aumento da ação mecânica do arco na poça de fusão, fazendo com que a poça seja “escavada” possibilitando ao arco agir mais profundamente no metal de base, ao invés de apenas superaquecer o metal já fundido. Devido a isso, é possível observar na Figura 25 que o processo plasma é capaz de produzir cordões mais estreitos e de maior penetração.

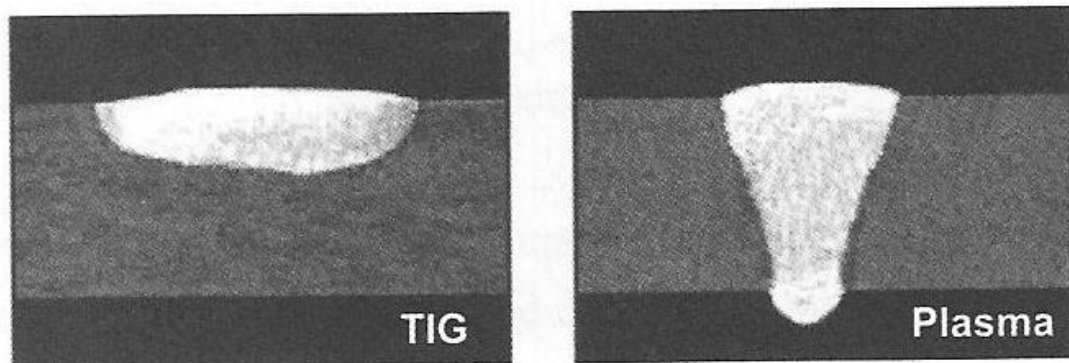


Figura 25 - Perfis típicos de cordões em solda pelos processos TIG e Plasma (REIS, 2007)

A zona termicamente afetada (ZTA) também é reduzida devido à colimação do arco-plasma, pois reduz a área e aumenta a concentração do calor. Isso diminui as distorções térmicas e aumenta a eficiência térmica de fusão, podendo soldar chapas de até 10 mm em um único passe. Também devido à forma cônica do arco plasma, a alteração da temperatura em diferentes planos do arco é menos sensível a variações na distância tocha peça, o que leva à menores alterações na concentração do calor por sobre a chapa (Figura 26).

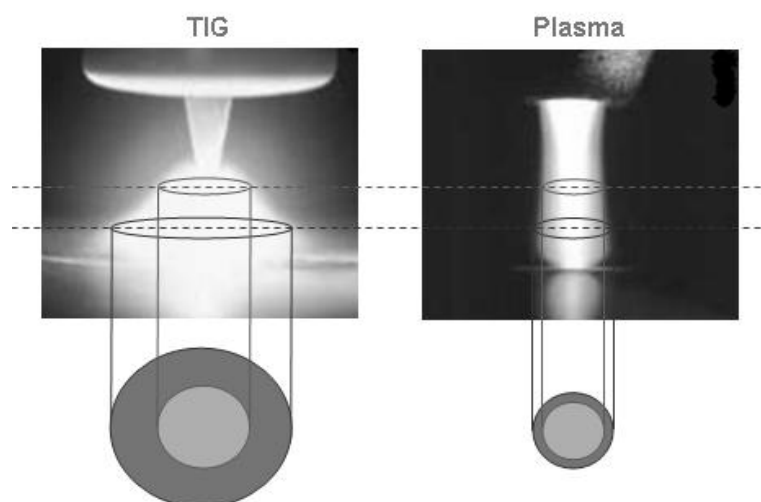


Figura 26 - Distribuição de temperatura em planos pelos processos TIG e Plasma (REIS, 2007)

Assim como no processo MIG/MAG a CEA e CEF são de grande importância na soldagem a plasma, pois elas que ditam as condições de trabalho. A Figura 27 mostra a CEA para os processos TIG e Plasma. Outro detalhe da CEA do processo a plasma é a possibilidade de se trabalhar com correntes relativamente baixas (entre 0,1 a 15A). Isso acontece porque nos arcos não-constritos (TIG) o arco tende a ser perturbado por campos magnéticos relativamente fracos, o que impede de se trabalhar em baixos níveis de correntes. Já na soldagem a plasma o arco é mais rígido, o que garante maior resistência a perturbações magnéticas, possibilitando se trabalhar nessa região de menor nível de corrente.

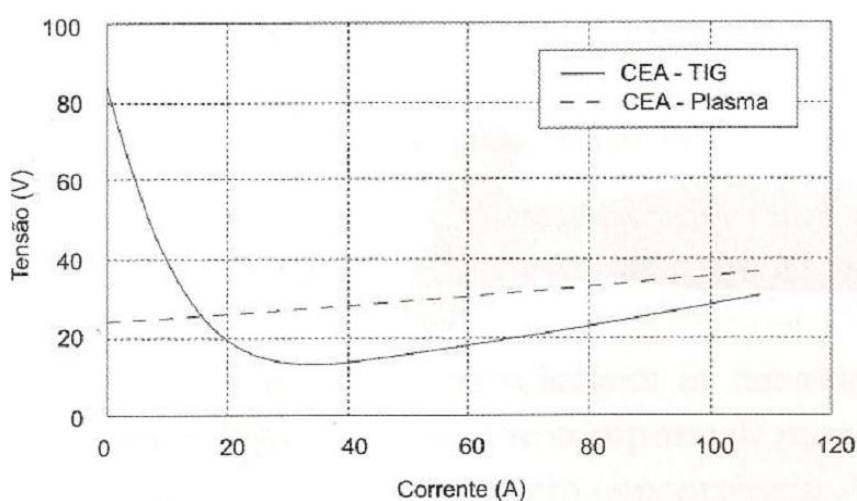


Figura 27 - Característica estática do arco (CEA) nos processos TIG e Plasma (REIS, 2007)

O processo plasma requer uma fonte do tipo corrente constante, ou seja, a tensão do arco ficará livre para poder variar na tentativa de manter a corrente relativamente

constante. O motivo dessa exigência de empregar fontes do tipo corrente constante deve-se à CEA no processo plasma. O ponto de encontro da CEA com CEF é que define o ponto de trabalho. Na soldagem a plasma a característica estática do arco é bem horizontal. Desse modo, se fontes do tipo tensão constante fossem utilizadas para soldagem a plasma, qualquer pequena variação nos parâmetros operacionais de soldagem, como a distância do bocal-peça, poderia provocar uma grande variação no valor da corrente de soldagem, o que não acontece na utilização de fontes do tipo corrente constante (Figura 28).

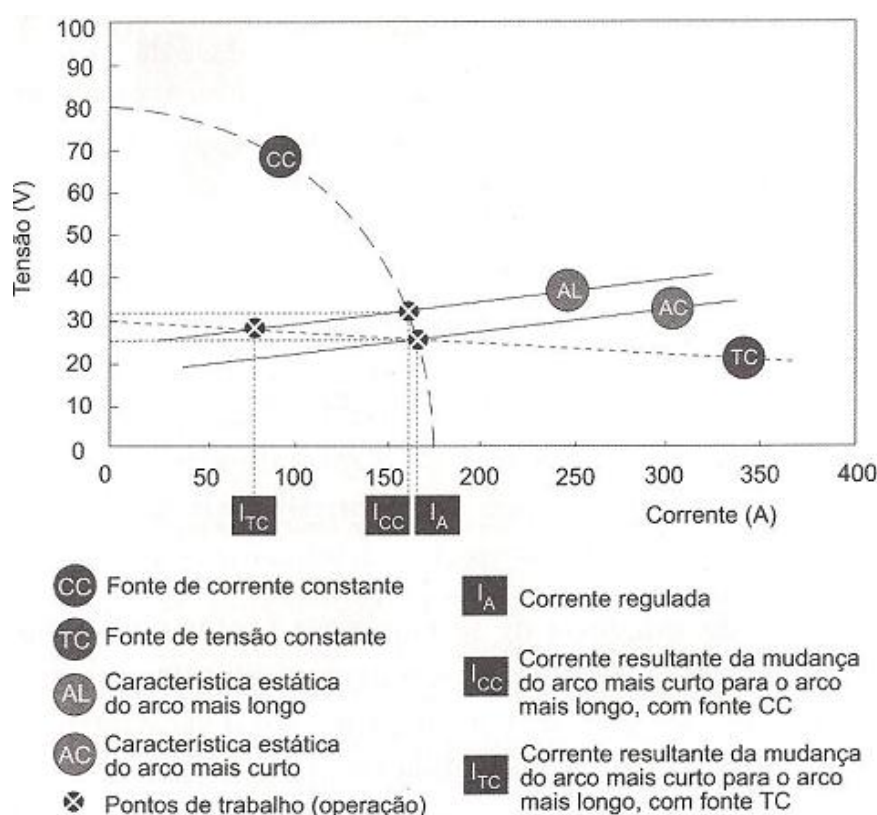


Figura 28 - Efeito do comprimento do arco sobre a corrente de soldagem para fontes do tipo corrente constante e tensão constante (REIS, 2007)

Na soldagem a plasma o tipo de corrente preferencial é do tipo corrente contínua constante (CC) na polaridade direta, ou seja, o eletrodo como pólo negativo. Nessa polaridade a emissão de elétrons se dá do eletrodo para o metal de base, como mostra a Figura 29. Esse fenômeno é denominado Emissão Termiônica. Nesta configuração o calor é menor no eletrodo e maior no metal de base, o que aumenta a vida do eletrodo de tungstênio pela diminuição de sua temperatura e aumenta o calor na poça de fusão, configuração que permite maior penetração.

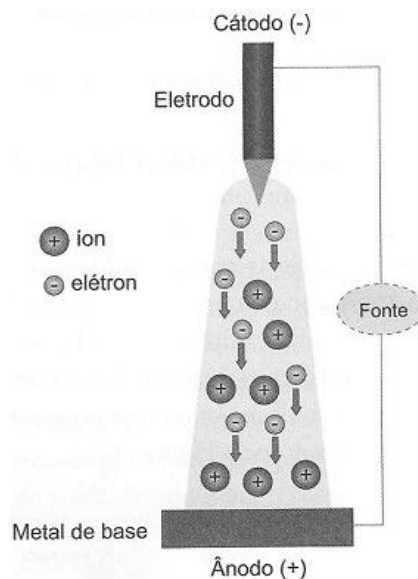


Figura 29 - Direção do fluxo de elétrons na polaridade direta (REIS, 2007)

Na soldagem a plasma as propriedades dos gases como, densidade, potencial de ionização, condutividade térmica e reatividade do gás com o metal de base, são o que define o gás a ser utilizado no processo. Como neste processo existem dois fluxos de gás, chamados gás de plasma e gás de proteção, a escolha deve ser mais rigorosa.

No gás de plasma são utilizadas vazões entre 0,25 a 2,5 L/mim. O gás deve ser inerte ou redutor para evitar o consumo excessivo do eletrodo de tungstênio que é bastante reativo. O argônio é preferido devido à sua alta densidade, que melhora a ação mecânica do jato de plasma, e por seu baixo potencial de ionização, que facilita a abertura do arco. Por isso, os gases mais utilizados para a função de gás de plasma são o argônio e misturas de argônio com hidrogênio ou hélio. A adição do hidrogênio (no máximo 10%) ajuda na focalização do arco por um efeito de constrição térmica, e sua alta condutividade térmica também ajuda na entrega de calor ao metal de base. Todavia a utilização deste gás fica vetada em aços de alto carbono devido ao risco de trincas e ao alumínio devido à formação de porosidade. Quando não é possível a utilização do hidrogênio, o hélio pode ser utilizado por também provocar a focalização do arco. Porém, por seu custo mais alto o seu uso pode não ser justificado.

Como o gás de plasma não consegue proteger a solda por ser concentrado e por sua baixa vazão, o gás de proteção é utilizado com o objetivo de proteger a poça de fusão de contaminantes atmosféricos. O gás utilizado como gás de proteção não

precisa necessariamente ser igual ao gás de plasma. Como o gás de proteção não entra em contato com o eletrodo de tungstênio pode ser utilizado um gás reativo, ficando isto dependente do metal de base, com vazões variando de 10 a 30L/min utilizando como gás argônio, hidrogênio, hélio, O_2 , e CO_2 . Sendo o argônio sempre como gás principal. A adição de O_2 ou CO_2 tem como objetivo melhorar a molhabilidade do material fundido pela redução da tensão superficial. Já a adição do hidrogênio e do hélio tem por objetivo melhorar o comportamento térmico.

2.3 PROCESSO PLASMA-MIG

No intuito de aliar as características do processo de eletrodos não consumíveis, que tem um bom controle da geometria do cordão e do processo, com as do processo de eletrodo consumível, que tem uma alta produtividade e velocidade de soldagem, surgiu o processo híbrido Plasma-MIG, que agrupa em uma única pistola um arco Plasma e um arco MIG. Como esperado, este processo apresenta bons níveis de taxa de fusão e velocidade de soldagem, bem como eficiente atuação na geometria da solda (OLIVEIRA, 2006).

As primeiras pistolas de soldagem a Plasma-MIG foram confeccionadas nos anos 60 e 70. Essa pistola deve ser capaz de gerar um arco de Plasma e MIG simultaneamente. A primeira geração de pistolas é mostrada na Figura 30, na qual o eletrodo de tungstênio deve criar um arco com o metal de base envolvendo o arco de MIG (OLIVEIRA, 2006).

Neste tipo de tocha o eletrodo de tungstênio fica ao lado do bico de contato MIG. Devido ao alto desgaste do eletrodo de tungstênio em atmosferas oxidante o gás de plasma deve ter caráter inerte. Apesar de ter sido usada no início dos anos 80, este tipo de tocha não é muito operacional. Necessitava-se de um tipo de tocha mais compacta para ser melhor manipulada. Assim, outro tipo de tocha foi desenvolvido por Essers (ESSERS, 1981, apud OLIVEIRA, 2006), na qual o eletrodo pontiagudo de tungstênio é substituído por um eletrodo de cobre em forma de anel e concêntrico. Com isso foi possível deixar os arcos MIG e Plasma, concêntricos.

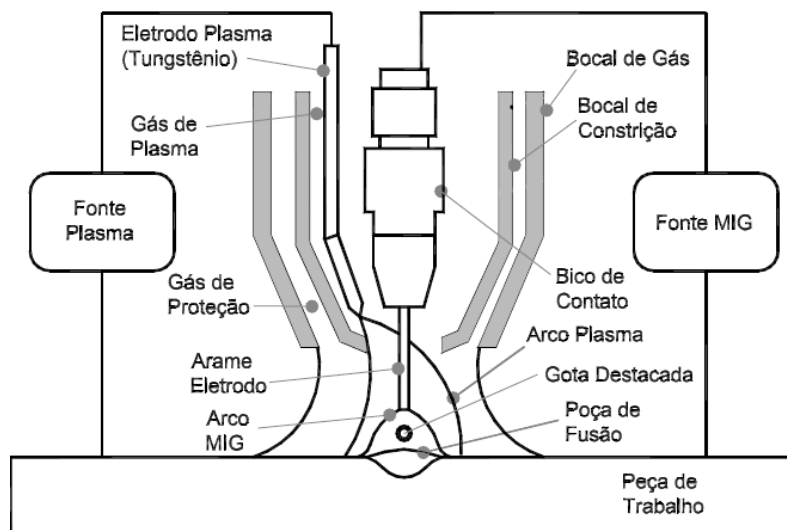


Figura 30 - Desenho esquemático da pistola de soldagem Plasma-MIG com eletrodo de tungstênio (ESSERS, 1972, apud OLIVEIRA, 2006)

Como a soldagem com polaridade reversa é reconhecida como a melhor para transferência metálica no processo MIG/MAG, foi necessário que o arco plasma também trabalhasse nessa configuração. Porém, como já foi dito anteriormente, a polaridade reversa no processo Plasma gera um aquecimento excessivo do eletrodo devido à forma de transporte dos elétrons ser pela Emissão por Campo. Isso justifica a substituição do tungstênio pelo cobre que tem uma alta condutividade térmica, facilitando a troca de calor com a água de arrefecimento e mantendo o eletrodo a baixos níveis de temperatura (Figura 31). Além disso, esse tipo de pistola é mais compacta e simétrica com melhor praticidade de manutenção (OLIVEIRA, 2006).

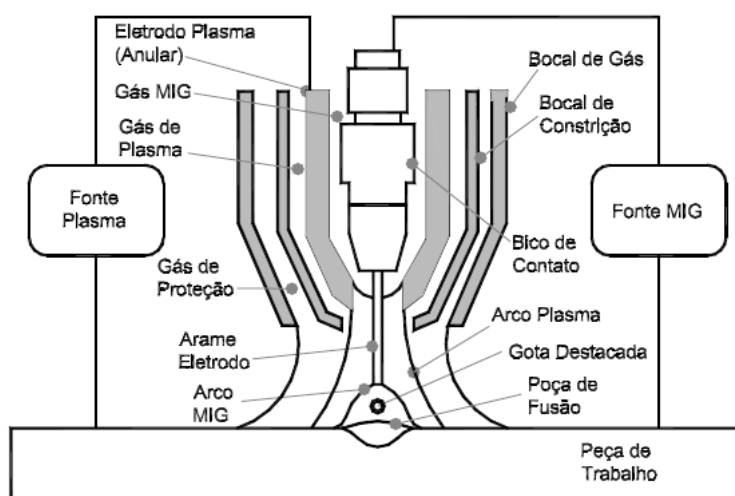


Figura 31 - Desenho esquemático da pistola de soldagem Plasma-MIG com eletrodo anular de cobre (ESSERS, 1981, apud OLIVEIRA, 2006)

No desenho esquemático acima nota-se a existência de 3 tipos de gases: gás de MIG, Plasma e de proteção. Também é possível notar a maior complexidade da pistola em comparação à pistola MIG/MAG (Figura 1).

O argônio é o principal gás e pode ser utilizado como gás de MIG, Plasma ou proteção. Para algumas aplicações são utilizados os gases Hélio, Hidrogênio e CO₂ em mistura com o argônio.

Na soldagem do aço e do alumínio observou-se certa estabilidade com a utilização do argônio como os três gases, porém, na soldagem do aço houve falta de molhabilidade e altura excessiva do reforço, sendo necessária a adição de CO₂ como gás de MIG (4% de CO₂ melhora sensivelmente molhabilidade). No entanto, a utilização de até 25% de CO₂ como gás de plasma ou de proteção não trouxe algum benefício. Todavia a utilização do CO₂ como gás de MIG piora a estabilidade gerando curtos-circuitos.

Pode-se utilizar uma única fonte para o arco Plasma e para o MIG, entretanto, a utilização de duas fontes separadas permite maior controle de cada processo.

O acendimento do arco pode se dar por duas formas, por um ignitor de alta frequência ou com o auxílio do arco MIG (Soft Start). Por ignitor de alta frequência pode-se acender o arco de forma direta ou com o auxílio de um arco piloto. O acendimento por alta frequência gera, entretanto, um elevado nível de ruído eletromagnético que pode causar interferências em sistemas eletrônicos que se encontram nas periferias das fontes de soldagem Plasma-MIG. Isso acontece devido à alta potência utilizada no ignitor em função da distância do eletrodo metal de base. Nem com a utilização do arco piloto para abertura do arco esse ruído é diminuindo, pois, o eletrodo circular não consegue concentrar a energia gerada pelos pulsos em razão da não existência de uma ponta como no eletrodo do processo plasma.

Por essas complicações na abertura do arco, Essers (ESSERS, 1981, apud OLIVEIRA, 2006) desenvolveu um método que utiliza o arco MIG para gerar um arco de baixa intensidade, que auxilia a formação do arco plasma. Esse método é chamado de Soft Start. A Figura 32 ajuda a entender o método Soft Start .

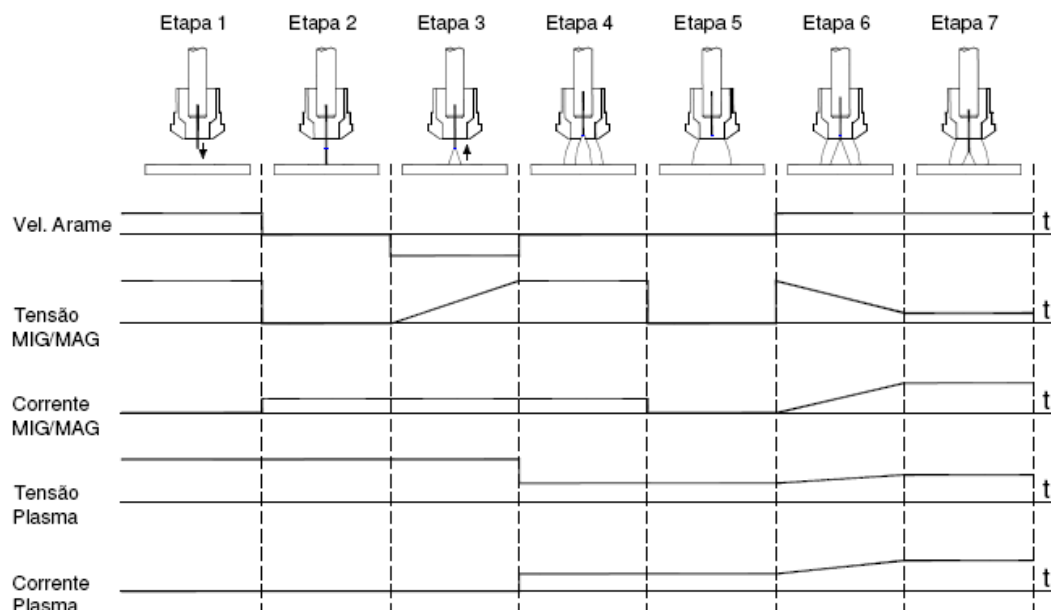


Figura 32 - Sequência de acendimento do método Soft Start (DRAUGELATES, 2001, apud OLIVEIRA, 2006)

Etapa 1 – No início do processo de acendimento do arco, as duas fontes apresentam tensão em vazio e o arame avança em direção à peça de trabalho.

Etapa 2 – A etapa 2 inicia no momento em que o arame toca a peça de trabalho. A partir deste momento, o movimento do arame é interrompido e a fonte MIG/MAG passa a impor uma corrente de baixo valor (~ 20 A).

Etapa 3 – O arame retrocede em direção à pistola de soldagem, provocando a abertura de um arco com correntes da ordem de 20 A entre sua ponta e a peça de soldagem, sem fusão considerável do arame. O arame recua até que este arco piloto atinja as proximidades do eletrodo plasma, quando se inicia a etapa 4.

Etapa 4 – Como a fonte plasma já possui tensão em vazio, ocorre o acendimento imediato do arco plasma no momento em que a atmosfera ionizada pelo arco MIG de baixa potência entra em contato com o eletrodo plasma.

Etapa 5 – Após o acendimento do arco plasma, o arco MIG é extinto com o objetivo de impedir transferência metálica e proporcionar um pré-aquecimento no início da junta somente com a energia do arco plasma.

Etapa 6 – O arame volta a se deslocar em direção à peça de trabalho. A fonte MIG apresenta novamente tensão em vazio. No momento em que a ponta do arame

entra em contato com a atmosfera ionizada pelo arco plasma, ocorre reacendimento espontâneo do arco MIG, sem necessidade de curto-circuito.

Etapa 7 – Soldagem com parâmetros de regime (OLIVEIRA, 2006).

2.3.1 Características térmicas do processo Plasma-MIG

No processo de soldagem Plasma-MIG pode-se considerar três formas de transferência de calor que vão pra peça de trabalho:

- a) O fenômeno que gera calor na região catódica (superfície da peça de trabalho, com polaridade reversa), como emissão termo-iônica e a interação de íons positivos com a superfície da poça de fusão;
- b) A energia transferida do arco para a peça, por condução, radiação e convecção;
- c) O calor contido nas gotas de metal fundido, que foi gerado por efeito joule no arame-eletrodo e na região anódica.

Segundo Essers (ESSERS, 1981, apud OLIVEIRA, 2006) na soldagem MIG/MAG a convecção, condução e radiação são responsáveis por 34% da transferência de calor para a peça. O calor gerado na região catódica é responsável por 41% do calor, enquanto o calor transferido pelas gotas corresponde a 25% do calor. O calor por convecção, condução, radiação e o gerado na região catódica que é de 75%, correspondem a largura do cordão e pouco influenciam na penetração. Já a energia contida nas gotas, seja térmica ou mecânica, é o que determina a penetração.

Makarenko (MAKARENCO, 2003, apud OLIVEIRA, 2006) apresentou a densidade de fluxo de calor “q” transferido para a peça em W/cm², para quando somente o arco plasma é aberto e depois para quando somente o arco MIG é aberto, e com isso traçou a curva correspondente ao Plasma-MIG (Figura 33).

A eficiência térmica é a quantidade de energia que chega à peça dividida pela potência cedida pela fonte. Essers mediu a eficiência térmica para o processo Plasma-MIG, que indicou com um valor médio de 65%.

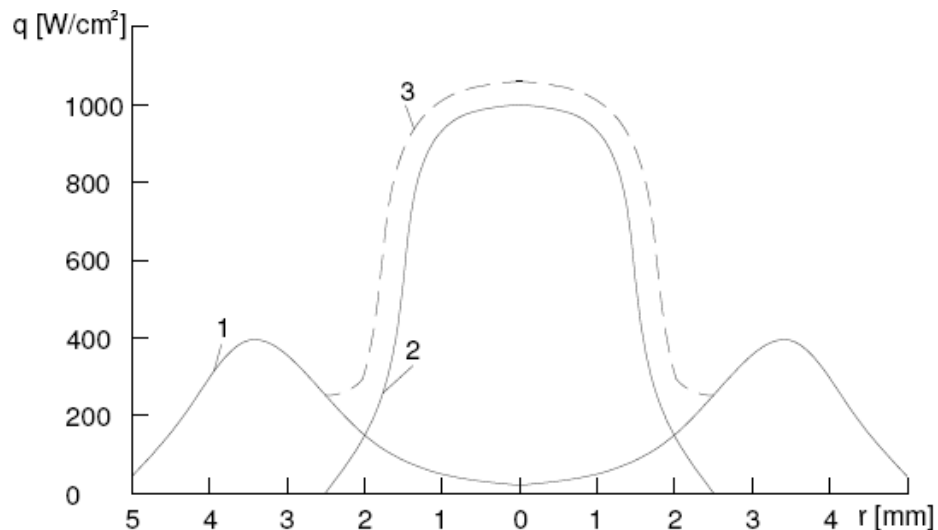


Figura 33 - Distribuição de densidade de potência para o Plasma-MIG (MAKARENKO, 2003).

No processo de soldagem Plasma-MIG são visualizados um arco interno com intensa luminosidade e um arco de plasma externo com menor luminosidade (Figura 34). Ton (TON, 1975, apud OLIVEIRA, 2006) utilizando espectrometria óptica fez medições na temperatura e na composição química dos arcos. O arco plasma apresentou somente linhas espectrais de argônio.

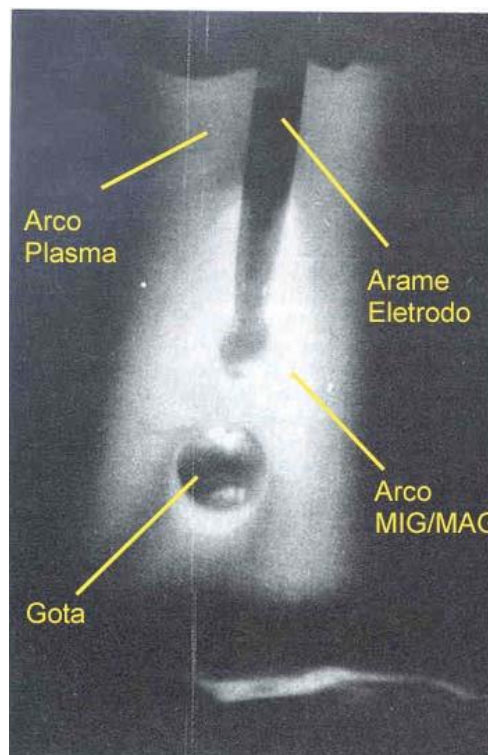


Figura 34 - Distribuição de densidade de potência para o Plasma-MIG (OLIVEIRA, 2006).

Já o arco MIG apresentou uma grande quantidade de argônio (97,6%) e pequenas quantidades de metal na forma de vapor (1,7% Fe, 0,5% Mn, 0,2% Cu e 0,02% Ca). Com exceção do argônio, os outros elementos contidos no arco MIG são provenientes de evaporação das gotas em transferência e do arame. Neste trabalho também foi medida a densidade de corrente nos dois arcos, Ton mostrou que a maior parte da corrente passa pelo arco plasma, com isso observou que o arco interno apresenta uma temperatura da ordem de 6.800 K, enquanto o arco externo apresenta uma temperatura em torno de 13.200 K. A maior luminosidade no centro dos dois arcos é explicada pela existência dos vapores metálicos no arco MIG.

Heuvel (VAN DEN HEUVEL, 1978, apud OLIVEIRA, 2006) mostrou que as gotas no processo Plasma-MIG atingem menor temperatura durante a transferência que no processo MIG/MAG - Figura 35.

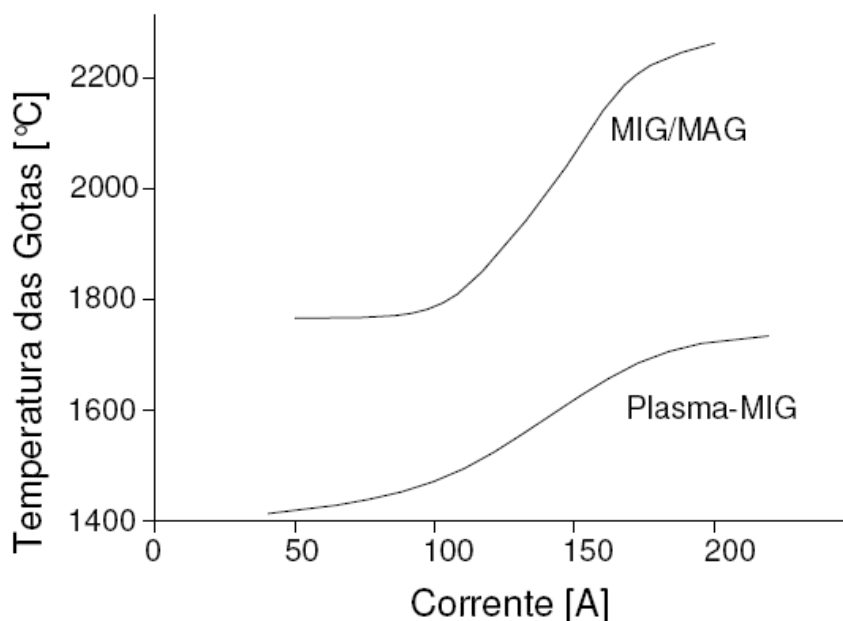


Figura 35 - Temperatura das Gotas em função da corrente através do arame-eletrodo para os processos Plasma-MIG e MIG/MAG. Corrente Plasma = 100 A. Arame-eletrodo: AISi5, 1,6 mm de diâmetro (VAN DER HEUVEL, 1978, apud OLIVEIRA, 2006).

No mesmo artigo Heuvel apresentou uma comparação do tamanho e frequência da gota nos processos Plasma-MIG e MIG/MAG em função da corrente do arame-eletrodo (Figura 36). Nos ensaios realizados não foi observada influência significativa da corrente de Plasma sobre o diâmetro da gota destacada.

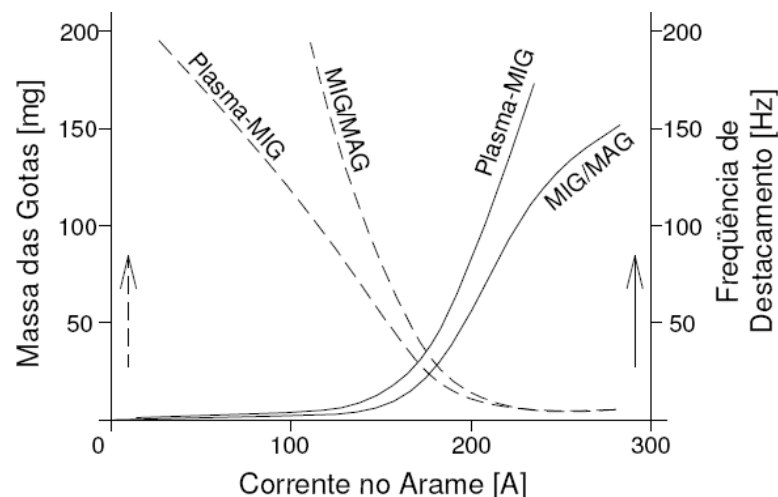


Figura 36 - Frequência de Destacamento e Massa das Gotas em função da Corrente através do arame para os processos Plasma-MIG e MIG/MAG em atmosfera de CO₂. Arame-Eletrodo: Aço Carbono, diâmetro = 1,2 mm. Corrente Plasma = 100 A (VAN DER HEUVEL, 1978, apud OLIVEIRA, 2006).

2.3.2 Características elétricas do arco do processo Plasma-MIG

Jelmorine em 1975 (apud OLIVEIRA, 2006) mostrou a característica estática do arco (CEA) Plasma-MIG e a comparou a CEA MIG/MAG (Figura 37). Foi visto que o arco Plasma-MIG é estável até em baixas correntes, diferentemente do processo MIG/MAG. O trabalho mostrou que o arco de Plasma ajuda a estabilizar o arco MIG em condições antes instáveis. Isso acontece por que no Plasma-MIG o modo de transferência globular não afeta a estabilidade da corrente.

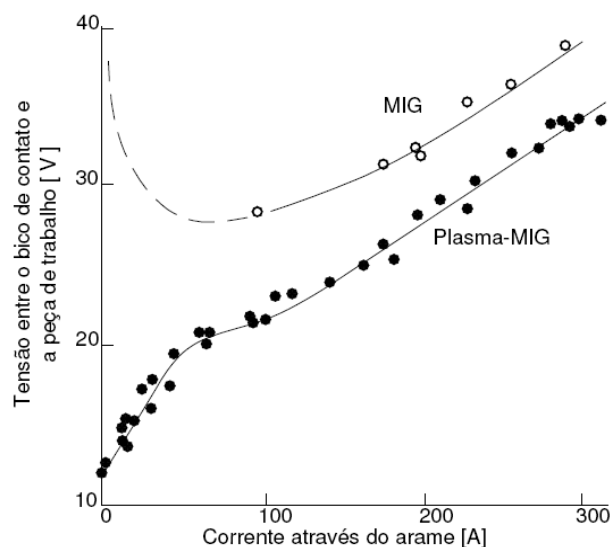


Figura 37 - Características Tensão x Corrente dos processos Plasma-MIG e MIG convencional (JELMORINI, 1975, apud OLIVEIRA, 2006).

A coexistência de dois arcos de diferentes naturezas, do arame-eletrodo e do fluxo de gás ionizados, forma um complexo sistema no qual fenômenos elétricos e físicos dificultam o entendimento da estabilidade do processo.

A Figura 38 mostra um oscilograma real da soldagem Plasma-MIG trabalhado com corrente MIG pulsada. Foi possível observar que a pulsação da corrente MIG provocou características pulsadas na tensão de Plasma e MIG, permanecendo a corrente de Plasma constante.

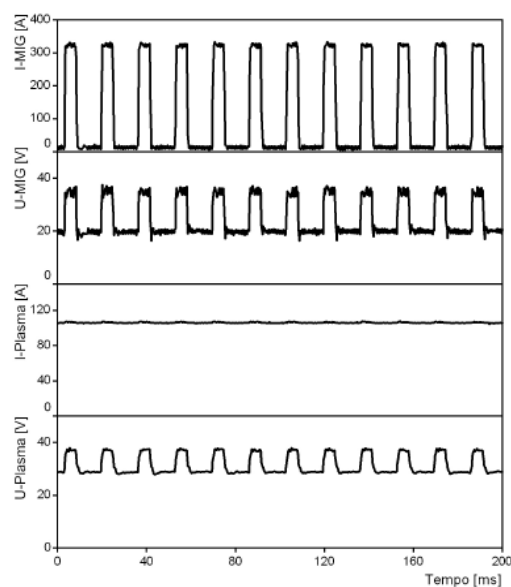


Figura 38 - Soldagem Plasma-MIG com pulsação da corrente de MIG (OLIVEIRA, 2006).

Como é mostrada na Figura 39, a CEA no processo Plasma-MIG a tensão de Plasma e MIG é função da corrente de MIG. Com isso é possível desenvolver um modelo elétrico para o processo.

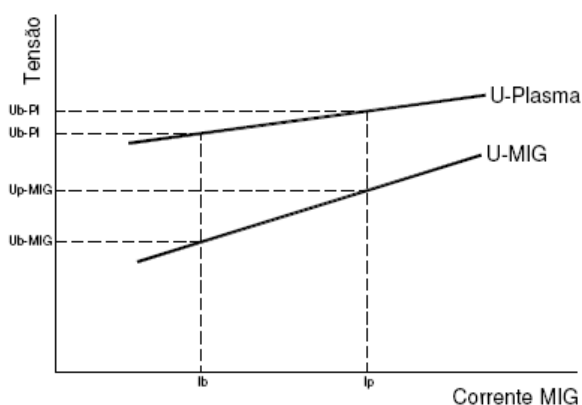


Figura 39 - Diagrama Esquemático da Característica Estática do Processo Plasma-MIG. I_b = Corrente MIG de Base; I_p = Corrente MIG de Pulso; U_b designa tensão de base e U_p designa tensão de pulso (OLIVEIRA, 2006).

Matthes (MATTHES, 2002, apud OLIVEIRA, 2006) apresentou um modelo elétrico para o processo Plasma-MIG baseado em cargas resistivas. Porém, esse modelo não conseguiu explicar o acendimento de um arco entre o eletrodo de plasma e o bico de contato MIG. Este arco gerava instabilidades e destruição da pistola de soldagem.

Em 2007 Oliveira e Dutra criaram um modelo elétrico para o processo Plasma-MIG baseados no modelo de Gohr (GOHR JR, 2002, apud OLIVEIRA, 2006) para o processo MIG/MAG. Esse modelo, além de considerar o arco uma carga resistiva, apresenta características de uma força contra eletromotriz (Figura 40) (DUTRA, 2007).

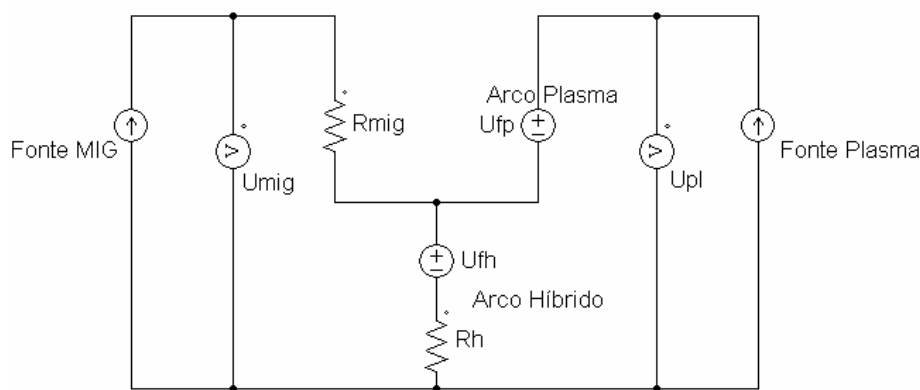


Figura 40 - Modelo elétrico para o processo Plasma-MIG (DUTRA, 2007)

Nesse novo modelo se considera que acima da ponta do arame-eletrodo existe um arco Plasma e abaixo existe um arco híbrido, onde circulam as correntes de Plasma e MIG sem distinção (Figura 41). Com essa afirmação foi possível criar o modelo (Figura 42) e descrevê-lo pelas Equações 4 e 5.

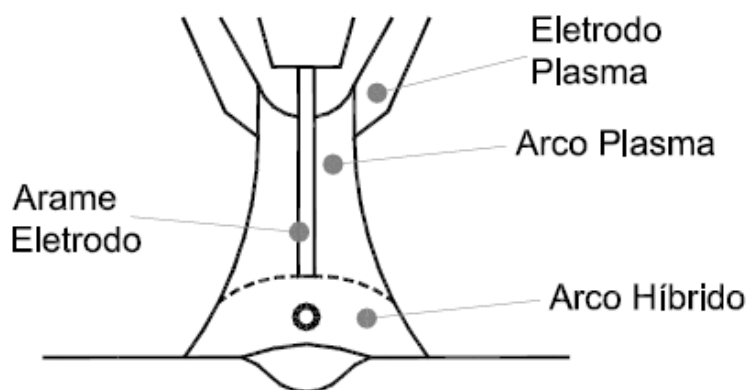


Figura 41 - Desenho esquemático do processo Plasma-MIG com arco de Plasma e Híbrido (OLIVEIRA, 2006)

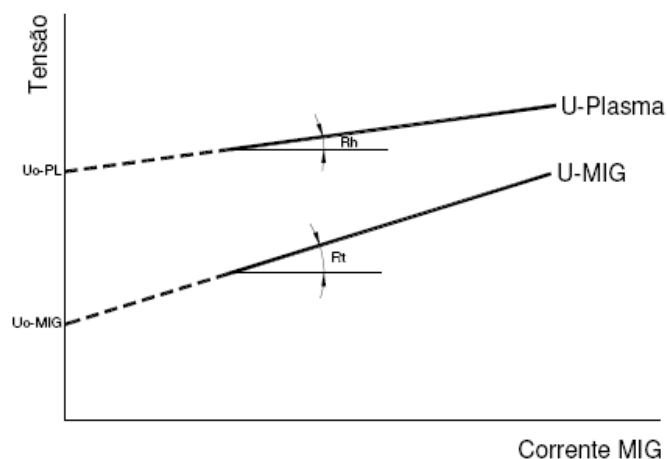


Figura 42 - Características estáticas do processo Plasma-MIG (OLIVEIRA, 2006)

$$U_{PI} = U_{0PI} + R_h \cdot I_{MIG}$$

Equação 4

$$U_{MIG} = U_{0MIG} + R_t \cdot I_{MIG}$$

Equação 5

Sendo

U_{PI} – tensão Plasma

U_{MIG} – tensão MIG

U_{0PI} – tensão de Plasma para uma corrente zero

U_{0MIG} – tensão de MIG para uma corrente zero

R_h – resistência do arco Híbrido

R_t – resistência total do sistema

Na Figura 43 foi mostrada a curva Tensão versus Corrente de MIG para cinco níveis de corrente de Plasma. Foi observado que só houve mudança na tensão de MIG quando a corrente de Plasma era igual à zero. Isso indica que a corrente de Plasma não influencia na tensão de MIG quando os dois arcos estão abertos. Uma das explicações para a queda de tensão de MIG quando o arco Plasma está aberto é que a atmosfera em volta do arame-eletro já se encontra aquecida e ionizada pelo arco Plasma, o que reduz a tensão necessária para que a corrente MIG se estabeleça.

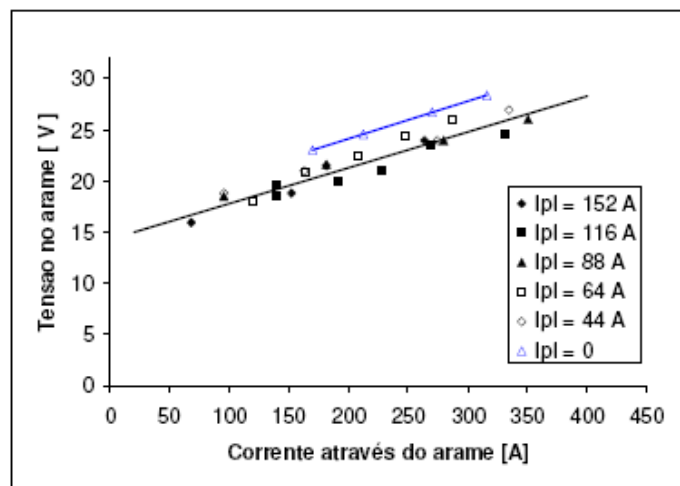


Figura 43 - Influência das correntes de MIG e Plasma sobre a tensão MIG (OLIVEIRA, 2006).

2.3.3 Tipos de Transferência Metálica Plasma-MIG

Os modos de transferência interferem diretamente nas características do cordão de solda e na estabilidade do processo. A adição de um arco plasma envolvendo o arco MIG ajuda a estabilizar o processo. Para soldagem do alumínio ou materiais com alta condutividade térmica é útil, pois, o arco plasma age pré-aquecendo o arame-eletrodo e a peça, já que esse tipo de soldagem é instável devido à incapacidade de armazenar o calor. O pré-aquecimento do arame-eletrodo ajuda a fluidizar melhor o arame na hora da formação da gota, diminuindo sua viscosidade e facilitando sua transferência.

No estudo dos tipos de transferência no processo Plasma-MIG, foram encontrados alguns modos de transferência, sendo os principais: curto-circuito, globular e goticular.

a) Transferência por Curto-circuito

Em outros processos de soldagem, com uma regulagem de parâmetros, se consegue uma boa estabilidade na transferência por curto-circuito, sendo muito utilizado na soldagem de chapas finas em todas as posições. Porém, no processo Plasma-MIG esse tipo de transferência não é estável, por isso não é desejada no processo.

Essa instabilidade vem devido à formação de um arco entre o eletrodo anular com o bico de contato (Figura 44). Isso acontece quando o arame-eletrodo faz um curto com a poça, esse curto constitui um caminho de menor impedância para a passagem da corrente de plasma. Outro fator que influencia nessa instabilidade é que, quando ocorre o curto, a corrente MIG aumenta e com isso também aumentam as forças eletromagnéticas, constringindo ainda mais o arco de plasma para o bico de contato.

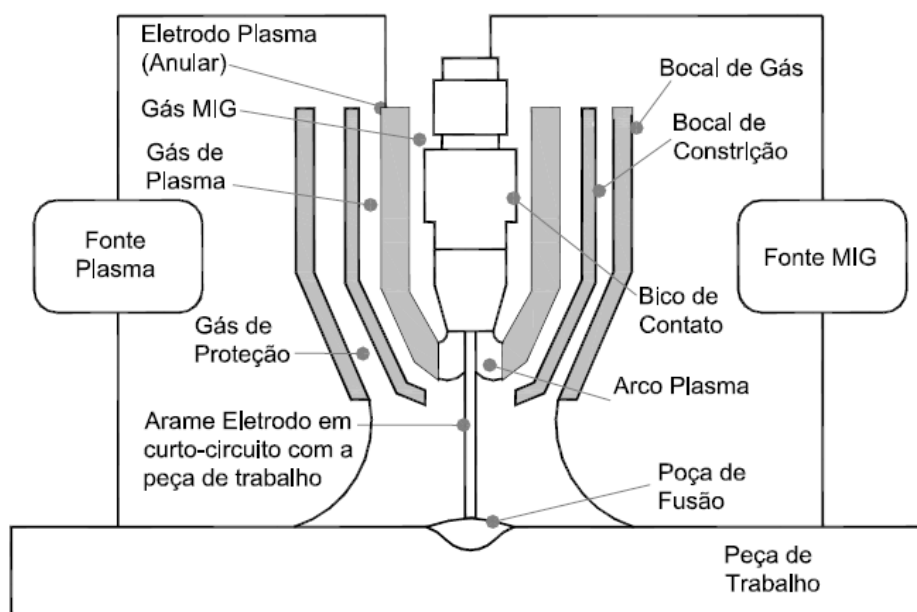


Figura 44 - Migração do arco Plasma para o bico de contato e arame MIG (OLIVEIRA, 2006)

No início do oscilograma observa-se que a soldagem vem se mantendo relativamente estável (Figura 45). Em seguida, uma pequena oscilação na velocidade do arame causa o primeiro curto circuito. Neste instante, observa-se apenas uma pequena oscilação na tensão plasma, mas após o curto circuito o arco plasma continua estável. No final do segundo curto circuito observa-se uma repentina queda da tensão plasma. Neste instante, acredita-se que o arco plasma deixa de circular entre o eletrodo anular e a peça de soldagem, e passa a circular entre o eletrodo anular e o bico de contato. No momento em que o cátodo do arco Plasma migra para o bico de contato, as duas correntes passam a circular pelo arame-eletrodo, o que explica um aumento instantâneo da tensão Plasma, que se mantém em um patamar mais elevado. Mesmo após a reabertura do arco MIG, a corrente plasma continua circulando através do arame, pois a tensão não cai aos valores anteriores aos curtos-circuitos. No terceiro curto-circuito observa-se que o

arco plasma ainda se mantém aceso, pois a corrente plasma continua circulando. Entretanto, imediatamente após a reignição do arco MIG, observa-se que a tensão plasma sofre um pico muito elevado, causando a extinção do arco plasma. A partir deste ponto, uma série de curtos-circuitos ocorre, e o processo é totalmente instável.

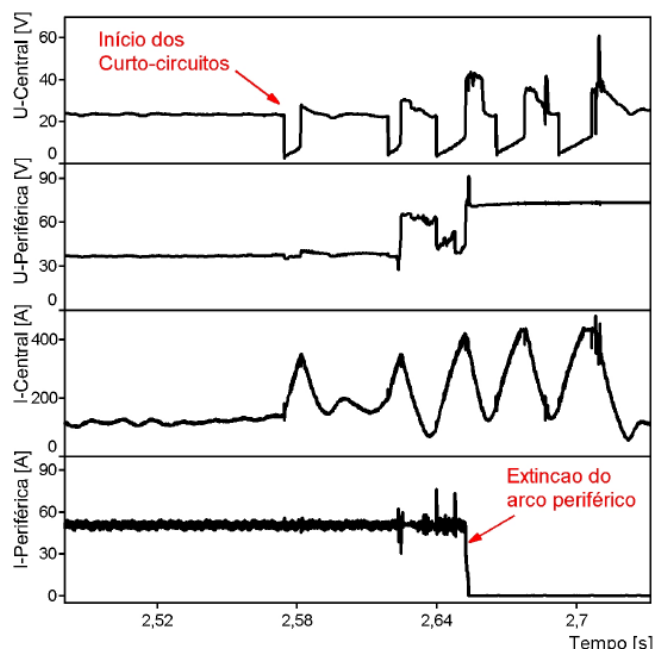


Figura 45 - Instabilidades no arco Plasma causadas por curtos-circuitos arame-eletrodo/peça (OLIVEIRA, 2006)

A soldagem por curto-circuito no processo Plasma-MIG é possível com a adição de uma bucha de isolamento no bocal para evitar a transferência do arco para o bico de contato.

Bai (BAI, 2010) estudou os modos de transferência metálica do alumínio utilizando o processo Plasma-MIG. A Figura 46 mostra o oscilograma da transferência por curto-circuito realizado por Bai. Nota-se que a corrente de Plasma quase não variou com os curtos-circuitos. Na Figura 47 vê-se a transferência metálica por curto-circuito do oscilograma mostrado.

Diferente da transferência por curto-circuito no processo MIG/MAG, que tem como consequência grande volume de respingos, na transferência por curto-circuito pelo processo Plasma-MIG a solda não obteve respingos. Porém, devido ao pequeno tempo de arco aberto obteve uma pequena penetração em comparação com os outros modos de transferência (Figura 48).

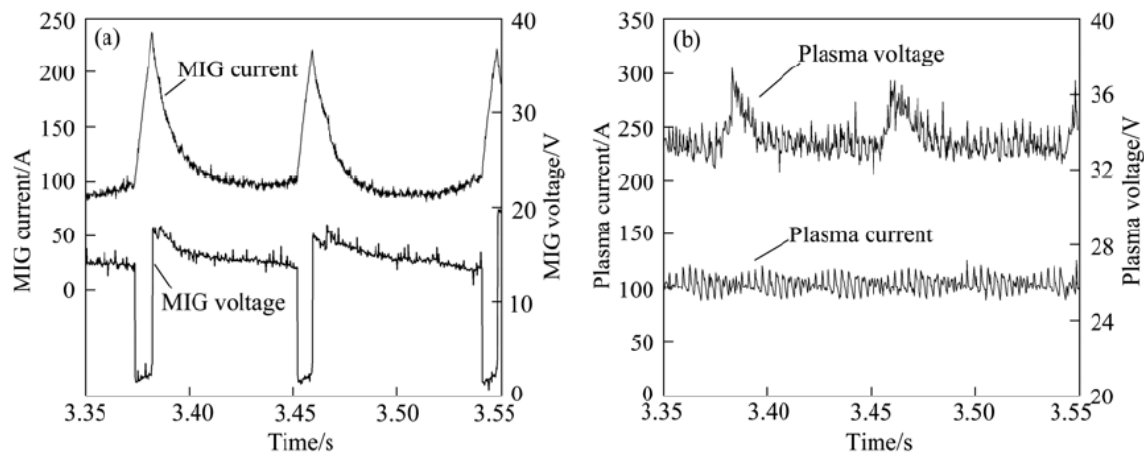


Figura 46 - Oscilograma da corrente e da tensão do processo Plasma-MIG no modo transferência por curto-circuito (BAI, 2010)

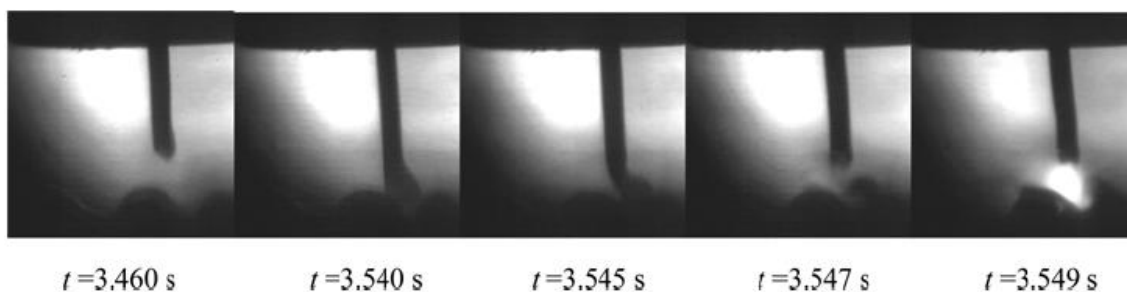


Figura 47 - Imagem da transferência da gota por curto-circuito Plasma-MIG (BAI, 2010)

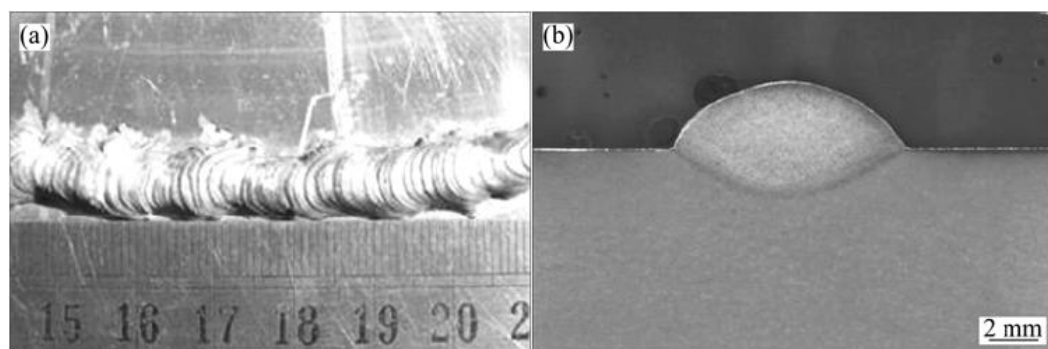


Figura 48 - Imagem da solda na transferência por curto-circuito pelo processo Plasma-MIG, (a) aparência superficial do cordão, (b) vista da seção transversal (BAI, 2010)

b) Transferência Globular

Esse tipo de transferência ocorre quando se utiliza tensões de arcos moderadas a altas (impossibilitando o curto-circuito) e baixas correntes (forças eletromagnéticas não significativas). Esse modo apresentou boa estabilidade, ausência total de respingos e regularidade na frequência de destacamento, o que não era encontrado nesse tipo de transferência no processo MIG/MAG. A Figura 49 mostra um

oscilograma nos quais os picos de tensão MIG são devidos ao destacamento da gota (OLIVEIRA, 2006).

No processo MIG/MAG a instabilidade se deve ao fato da região anódica possuir um diâmetro menor que o da gota de metal fundido presa ao arame, o que causa uma força eletromagnética contrária ao destacamento. Já no processo Plasma-MIG o metal fundido que forma a gota presa ao arame é envolvido pela atmosfera aquecida e ionizada do arco plasma. Dessa forma a corrente MIG teria maior facilidade para fluir devido à uma área maior, eliminando assim o efeito repulsivo (Figura 50).

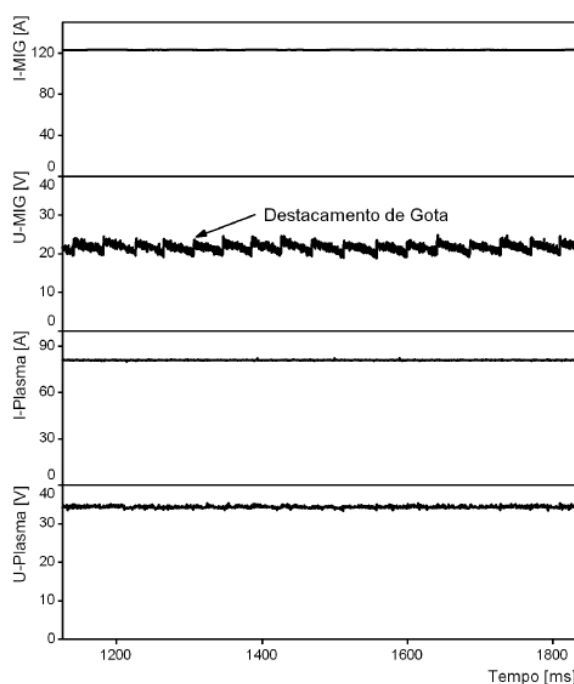


Figura 49 - Oscilograma do modo de transferência globular no processo Plasma-MIG (OLIVEIRA, 2006)

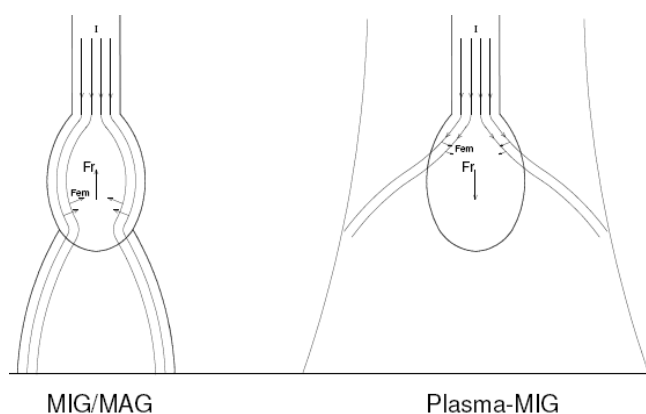


Figura 50 - Comparação da distribuição de corrente na gota fundida para o processo MIG/MAG e Plasma-MIG (OLIVEIRA, 2006)

c) Transferência Goticular

Aumentando-se ainda mais a corrente e ultrapassando a corrente de transição, passamos da transferência globular para a goticular. O comportamento é semelhante à transferência goticular no processo MIG/MAG onde ocorre um aumento na frequência de destacamento e uma diminuição no diâmetro da gota. A variação da tensão de MIG é muito menor comparada à do modo globular (Figura 51). No processo MIG a poça sofre intensa influência da pressão do arco provocando uma depressão no centro do metal fundido. Já no processo a plasma esse efeito é atenuado em função da menor intensidade de corrente dentro da coluna (OLIVEIRA, 2006).

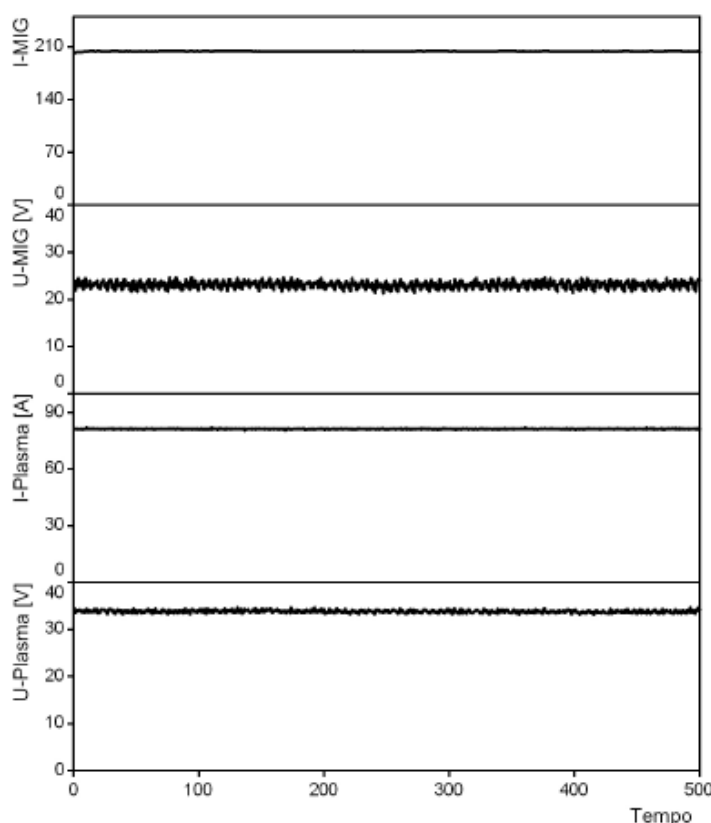


Figura 51 - Oscilograma do modo de transferência goticular no processo Plasma-MIG (OLIVEIRA, 2006)

Este tipo de transferência não é encontrado na soldagem do alumínio pelo processo MIG/MAG pela dificuldade de se formar uma “ponta de lápis”, em função da alta condutividade do alumínio e a sua alta viscosidade (BAI, 2010).

2.3.4 Taxa de Fusão do Arame-eletrodo

Para uma análise da taxa de fusão do arame, se faz necessário um controle do tipo corrente constante para a corrente de MIG, já que no tipo tensão constante pode ocorrer flutuação na corrente e, por consequência, na frequência de destacamento da gota.

A Figura 52 compara a velocidade do arame pelo processo Plasma-MIG e MIG/MAG ao aumento da corrente de MIG. Não foi possível alcançar velocidades de alimentação superior a 13 m/min para o Plasma-MIG em virtude de instabilidades no processo (OLIVEIRA, 2006).

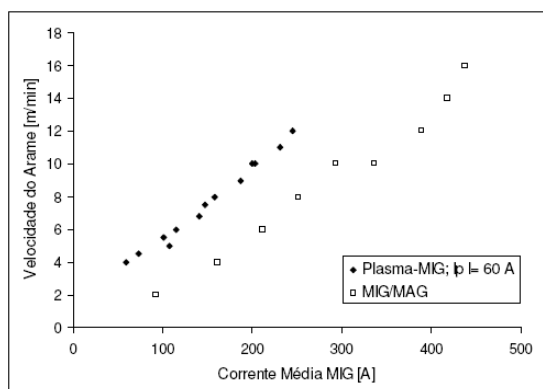


Figura 52 - Comparação da velocidade de alimentação do arame pela corrente MIG para os processos MIG/MAG e Plasma-MIG (OLIVEIRA, 2006)

Oliveira também analisou a velocidade de alimentação versus a corrente de MIG para quatro níveis de corrente de plasma na soldagem com alumínio (Figura 53). Os pontos foram ajustados por retas pela Equação 6.

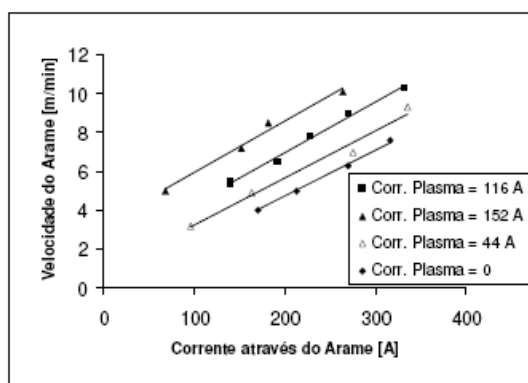


Figura 53 – Influência das correntes de plasma e MIG na velocidade de alimentação. Arame AlSi-5, 1,6 mm de diâmetro. Argônio como gás MIG, Plasma e de proteção, com vazões de 5, 5 e 10 l/min. (OLIVEIRA, 2006)

$$V_a = a.I_{MIG} + b$$

Equação 6

Sendo “a” o coeficiente angular da reta que depende da corrente de MIG e “b” o coeficiente linear da reta, que depende da corrente de plasma. A variação do coeficiente angular “a” em função da corrente de plasma foi desprezado, pois, manteve-se praticamente constante (valor médio de $a = 0,025$).

Nesse caso Oliveira montou um gráfico da variação de “b” com a corrente de plasma (Figura 54). Com a regressão linear dos pontos foi montada a Equação 7.

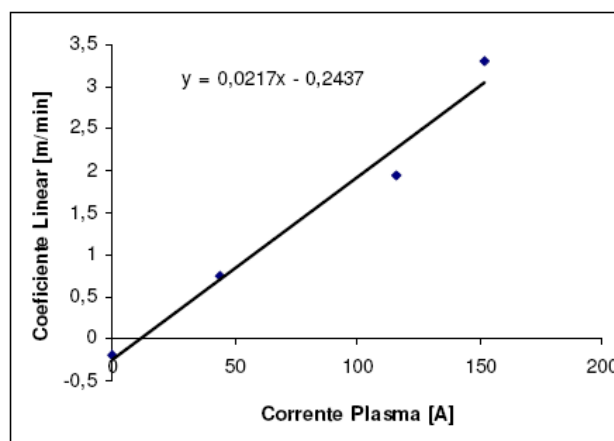


Figura 54 - Influência das correntes de plasma sobre o coeficiente linear “b” (OLIVEIRA, 2006)

$$b = 0,0217.I_{Pl} - 0,2437$$

Equação 7

Assim, foi possível achar uma equação para a velocidade de alimentação de arame do alumínio, 1,6 mm para uma atmosfera de argônio puro.

$$V_a = 0,025.I_{MIG} + 0,022I_{Pl} - 0,24 \quad [m/min]$$

Equação 8

Foi possível também obter uma fórmula para a velocidade de alimentação do cobre semelhante à do alumínio. Entretanto, no caso da soldagem utilizando um arame de

aço carbono apresentou uma resposta diferente. Foi observado que quanto maior a corrente de MIG menor é a influência da corrente de plasma na taxa de fusão (Figura 55).

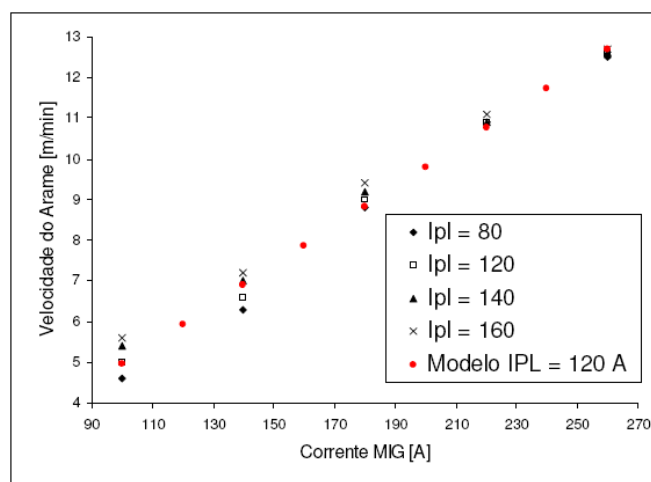


Figura 55 - Influência das correntes de plasma e MIG sobre a velocidade de alimentação utilizando um arame de aço carbono, 1,2 mm de diâmetro e uma mistura de argônio com 4% de CO₂ como gás MIG (OLIVEIRA, 2006)

Foi analisada também a influência do comprimento do eletrodo livre sobre a taxa de fusão. Manteve-se uma corrente de plasma de 120A e dois níveis de comprimento livre do eletrodo “L_e” 12 e 16 mm (Figura 56).

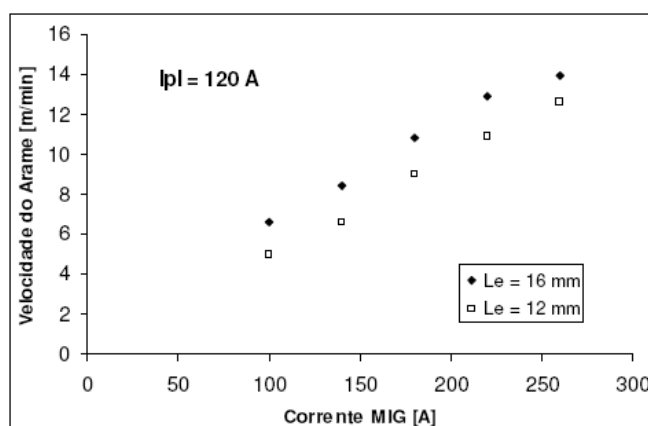


Figura 56 - Influência do comprimento livre do eletrodo na taxa de fusão do arame para o aço carbono (OLIVEIRA, 2006)

A corrente de plasma não é responsável pela geração de calor interno no eletrodo por efeito joule. O incremento da taxa de fusão pelo arco de plasma se deve à capacidade do arame-eletrodo em absorver a energia disponibilizada pelo arco de plasma.

Segundo Oliveira (OLIVEIRA, 2006) essa transferência de energia depende dos seguintes mecanismos:

- Área de contato entre arame-eletrodo com o arco de plasma;
- Propriedades termodinâmicas do arame e do plasma, como condutividade térmica, refletividade e absorvância;
- Condições do fluxo de plasma sobre a superfície do eletrodo.

Por esses mecanismos de transferência do calor do arco plasma para o arame-eletrodo descritos acima, podemos explicar o porquê da diferença da influência da corrente plasma no alumínio com o aço carbono, em razão da maior condutividade térmica do alumínio que permite a ele absorver maiores quantidades de energia do arco plasma durante a passagem do arame.

A influência da corrente de plasma na taxa de fusão do aço carbono cai com o aumento da corrente MIG, pois junto com o aumento da corrente aumenta-se a velocidade de alimentação, diminuindo assim o tempo de troca de calor do arame com o arco plasma, o que reduz sua contribuição para taxa de fusão.

O aumento da taxa de fusão pelo aumento do comprimento livre do eletrodo deve-se à uma maior área de contato do arame com o arco plasma, já que a área de contato entre o arame e o arco plasma depende do diâmetro do arame e do comprimento livre do eletrodo em contato com o arco de plasma e é descrito pela Equação 9.

$$A_{cep} = \pi \cdot d_a \cdot L_{cep}$$

Equação 9

Entendendo a interação do arco de plasma com o arame-eletrodo, podemos melhorar o desempenho do processo e também entender onde o processo pode ser aplicado. Um exemplo disso é que arames de baixa condutividade térmica podem não apresentar bons resultados quando o objetivo é aumentar a taxa de fusão (OLIVEIRA, 2006).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a análise das condições operacionais do equipamento, foi montada no Laboratório de Soldagem da UFES uma bancada para realização de cordões de solda. Esta bancada deve permitir uma soldagem automatizada com um controle da velocidade de soldagem (Figura 57).

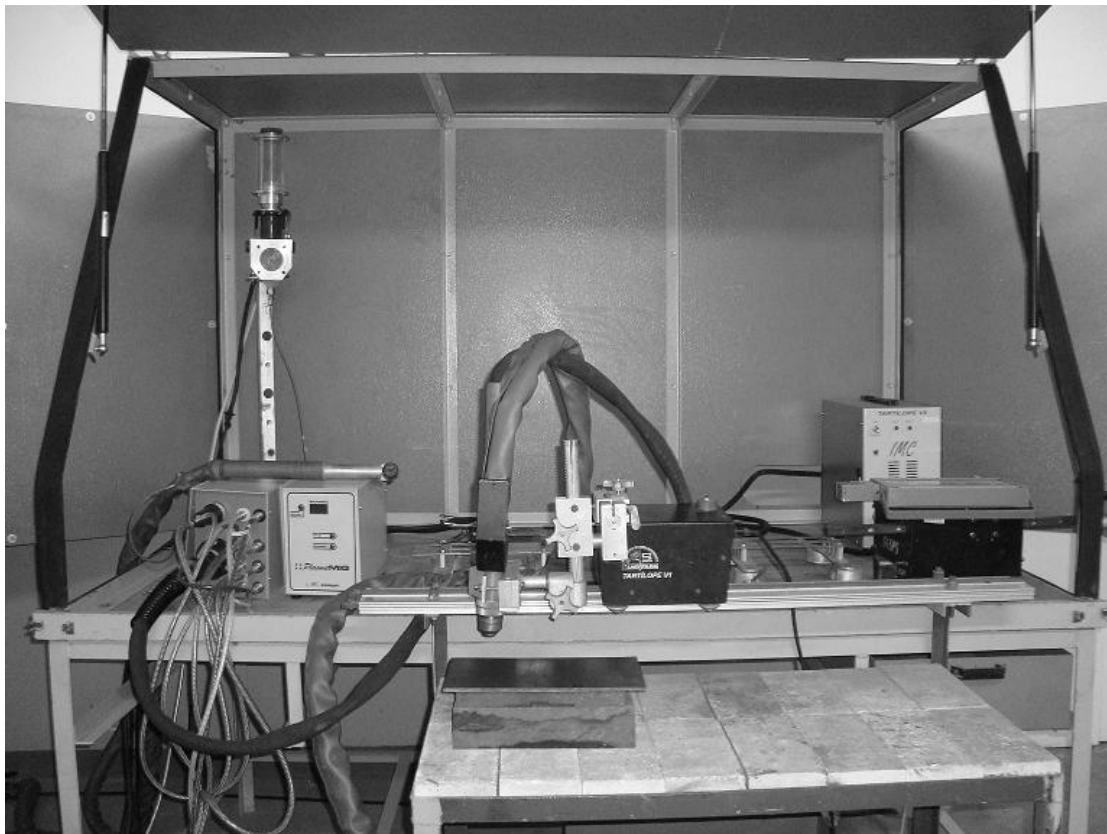


Figura 57 - Bancada de realização dos testes do Laboratório de soldagem da UFES

3.1 EQUIPAMENTOS

a) Fonte de Soldagem

Foi utilizada uma fonte *DIGIPlus A7* produzida pela empresa *IMC soldagem*. Esta fonte é do tipo chaveada no secundário que tem menores perdas em comparação com as fontes analógicas. Este tipo de fonte também permite ser utilizada em outros processos de soldagem (Figura 58).



Figura 58 - Fonte de Soldagem Plasma-MIG

Devido a um controle eletrônico interno, esta fonte permite ligar, tanto o arco de Plasma quanto o arco MIG e até mesmo utilizar corrente pulsada em qualquer dos dois arcos, ela também conta com uma memória para o armazenamento de parâmetros de soldagem para uma reutilização posterior.

b) Sistema de Refrigeração

Em virtude das altas temperaturas alcançadas no processo de soldagem Plasma-MIG, a refrigeração é um fator primordial para manter a integridade da Pistola de soldagem. Essa refrigeração é feita em três partes da pistola que são: Eletrodo de Plasma, Bico de contato MIG, Bocal constritor.

Cada um deles possui um sistema próprio de circulação de água feito pela unidade de refrigeração UR-3, também produzida pela IMC soldagem (Figura 59).



Figura 59 - Unidade de refrigeração

A unidade conta com um reservatório de água de 7,5 litros e um trocador de calor. Essa unidade conta com 3 terminais de entrada e saída de água que dividem o mesmo reservatório. Como a falta de circulação de água é um fator crítico na hora da soldagem, essa unidade tem um sensor que se comunica com a fonte de soldagem, impedindo que o processo de soldagem inicie sem que as bombas estejam ligadas, dando uma maior segurança ao equipamento.

c) Sistema de Alimentação de Arame

A caixa de alimentação de arame é de onde saem as tochas de Plasma e a tocha MIG e por onde passam os gases e a água de refrigeração (Figura 60).

Aqui o arame é ligado com a fonte de soldagem e se desloca para a tocha. O elemento á direita da Figura 60 é o sistema de avanço e retrocesso manual do arame.

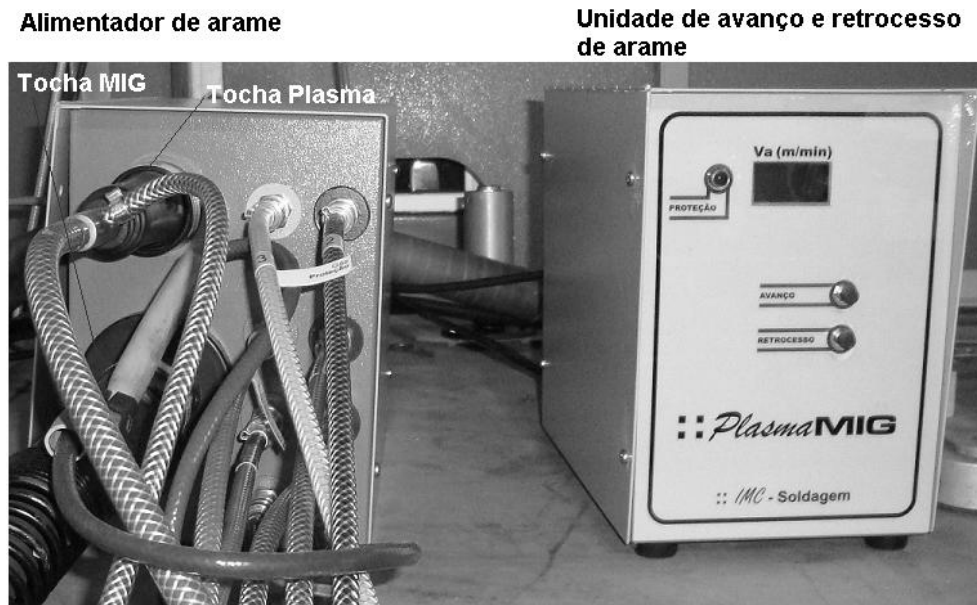


Figura 60 - Unidade de alimentação do arame e de controle de velocidade

d) Dispositivo de Deslocamento da Tocha

Para o controle da velocidade de soldagem foi utilizado o dispositivo de deslocamento *Tartílope V1* (Figura 61). Esse dispositivo se desloca ao longo de um trilho e permite controle da velocidade e da posição desejada.



Figura 61 - Dispositivo de deslocamento da tocha

e) Pistola de Soldagem

A pistola utilizada foi produzida pela *ASPS* (Figura 62). Na Figura 63 são vistos os componentes internos da tocha.

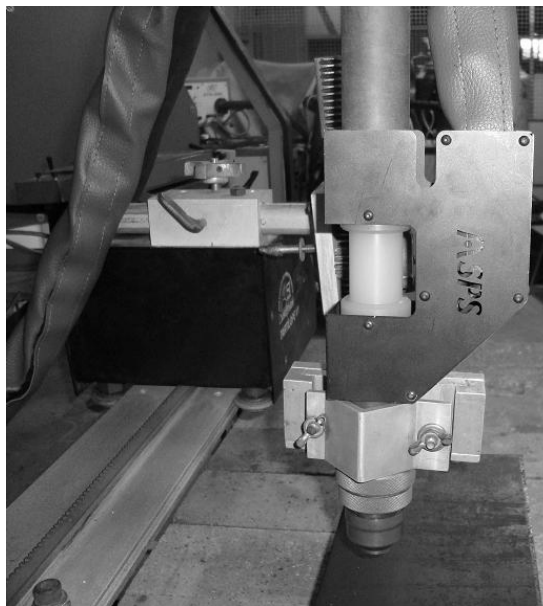


Figura 62 - Pistola Plasma-MIG



Figura 63 – Detalhe interno da Pistola

3.2 METODOLOGIA

Como o objetivo deste trabalho é o condicionamento e comissionamento do equipamento no Laboratório de Soldagem da UFES, buscou-se apenas a análise das condições de funcionamento do equipamento e a qualidade do processo, sem tentativa de otimização ou aplicações do processo.

Por isso foram realizadas soldas com única variação de parâmetros, sendo a corrente de Plasma, apenas para demonstrar a diferença que o arco de Plasma trás à soldagem.

Foi utilizado argônio para os três gases, com vazões de 5, 5 e 15 L/mim para gás de MIG, Plasma e proteção respectivamente. A distância do bico da tocha à peça ficou em 10 mm. As chapas usadas nos testes são de Aço carbono 1020 nas dimensões 300 x 150 x 6 mm. O arame eletrodo utilizado nos ensaios foi o AWS ER7036 com 1,2mm de diâmetro.

Os parâmetros iniciais foram de, 0,42 m/mim para a velocidade de soldagem, 7,1 m/mim para a velocidade de alimentação, 200 A para a corrente MIG e 60 A para a corrente de Plasma. Esses parâmetros foram retirados do artigo (DUTRA, 2009).

A escolha desses parâmetros se deve a tentativa de reproduzir o processo feito pelos autores e ter como base uma condição inicial. Os autores optaram por uma corrente de MIG de 200 A apenas para obtenção de uma transferência metálica goticular, já que essa corrente está acima da corrente de transição.

Após a realização da soldagem com esses parâmetros procurou-se variar a corrente de Plasma, para se ter uma noção da sua influência no cordão de solda (Tabela 1).

Tabela 1 – Parâmetros utilizados nos testes

Teste	Velocidade de Soldagem [m/mim]	Velocidade de alimentação [m/mim]	Corrente MIG [A]	Corrente Plasma [A]
1	0,42	7,1	200	60
2	0,42	7,1	200	100
3	0,42	7,1	200	40

Como o trabalho não tem o objetivo de se aprofundar nos parâmetros analisados, não foi necessária a aquisição dos dados em um oscilograma.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram realizados diversos ensaios nas condições do teste 1, para comprovar a eficiência do equipamento e capacidade do produto em realizar o serviço ao qual foi destinado. A qualidade da Solda pode ser atestada pela Figura 64.

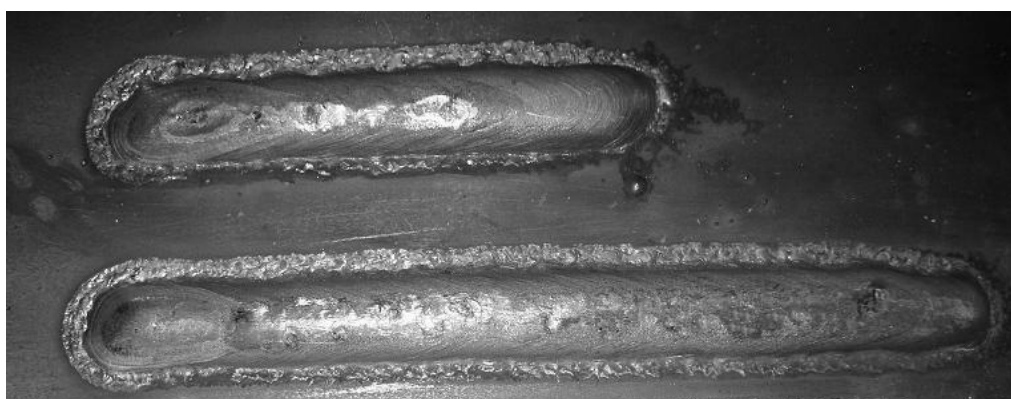


Figura 64 - Soldas realizadas com os parâmetros do teste 1

Com o intuito de mostrar como o cordão de solda é afetado pelo arco de Plasma, fizemos uma solda nas condições do teste 2 ao lado de uma nas condições do teste 1 (Figura 65), (Figura 66).

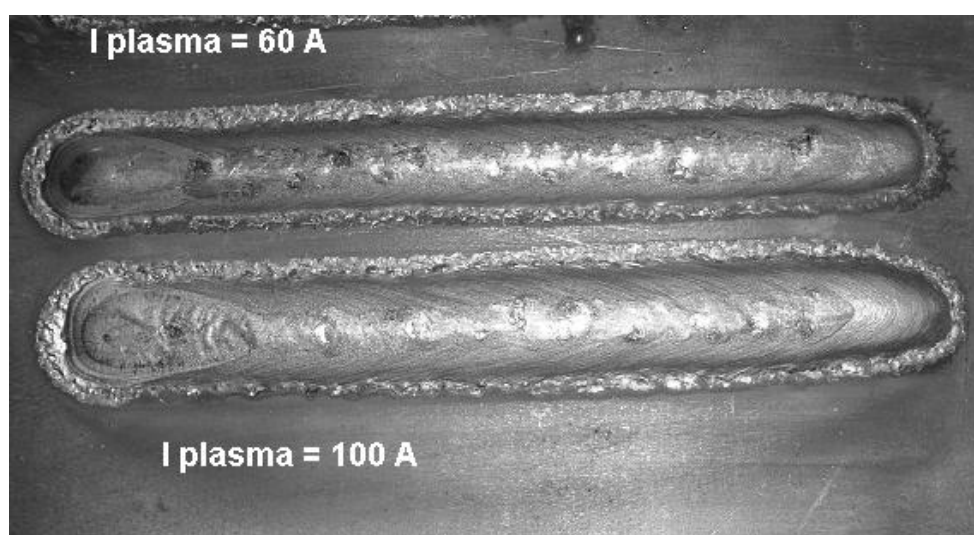


Figura 65 - Comparação entre a largura do cordão das soldas com os parâmetros do teste 1 e teste 2

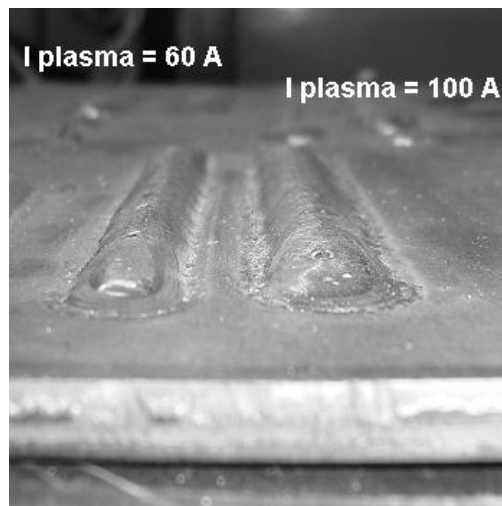


Figura 66 - Comparação entre a largura do cordão das soldas do teste 1 e teste 2

Vale lembrar que o único parâmetro que variou entre as soldas foi a corrente de Plasma, mantendo-se a alimentação de arame constante. Nota-se claramente que, quando se aumenta a corrente de Plasma o cordão de solda se torna mais largo e com menor reforço. Esse efeito ocorre, pois, quando o arame-eletrodo passa pelo arco de plasma recebe calor, e esse calor ajuda na fusão do arame, o fluidizando. Por isso, com um aumento na corrente de Plasma o arame-eletrodo recebe um calor adicional aumentando esse efeito.

No teste 3, diminuimos a corrente de Plasma para 40 A, para ver se o processo obedece essa relação (Figura 67).

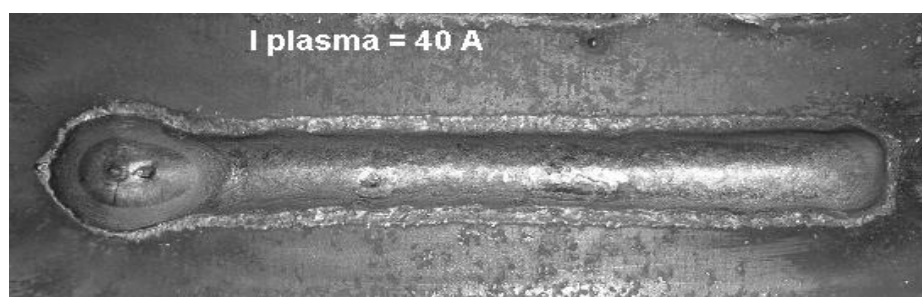


Figura 67 - Cordão de solda realizado com os parâmetro do teste 3

Como foi previsto, o cordão do teste 3 obteve menor largura e um maior reforço. Isso pode ser explicado da mesma forma que foi explicado no teste 2. Com a redução da corrente de Plasma diminui-se a quantidade de calor que o arame-eletrodo recebe quando passa pelo arco Plasma e com isso menos se fluidizara na solda.

5 CONCLUSÃO

Como o objetivo deste trabalho é reproduzir o que se esperava no processo de soldagem Plasma-MIG, a bancada montada no laboratório de soldagem da Ufes foi satisfatória para conduzir o processo com qualidade.

O equipamento se mostrou capaz de realizar de soldas pelo processo Plasma-MIG, ficando a cargo de trabalhos futuros a análise de parâmetros e aplicações do processo.

Com os ensaios realizados, mostramos a influência do arco Plasma sobre o processo e como ele interage. Com correntes de Plasma mais elevadas percebemos que houve uma diminuição da convexidade do cordão, aumentando sua largura e diminuindo seu reforço. Já com a diminuição da corrente de Plasma conseguimos uma solda mais convexa e com um maior reforço.

Depreende-se também que, o processo ficou livre de respingos e com um bom acabamento superficial, mesmo com uma alta velocidade de alimentação.

O presente estudo teve como objetivo secundário servir como um guia para os usuários futuros, facilitando o entendimento do processo e dos equipamentos que o envolvem, e com isso contribuir para o desenvolvimento de maiores pesquisas sobre o assunto.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(BAI, 2010) – BAI, Y; GAO, H; QUI, L. **Droplet transition for plasma-MIG welding on aluminium alloys**. 2007

(DRAUGELATES, 2001, apud OLIVEIRA, 2006) – DRAUGELATES, U; BOUAIFI, B; BARTZ, J. **Neue Entwicklungen beim Plasma-MIG-Hybridschweißen**. 7. Internationales Aachener Schweißtechnik Kolloquium, 03. – 04.05.2001. Band I, s.103 – 116.

(DUTRA, 2007) – DUTRA, J. C; OLIVEIRA, M. A. **Electrical mode for the Plasma-MIG hybrid welding process**. Welding and cutting, 2007.

(DUTRA, 2009) – DUTRA, J. C; RESENDE, A. A; FERRARESI, V. A, SCOTTI, A. **Influência das Correntes de Soldagem do Processo Plasma-MIG sobre a Geometria do Cordão de Solda e Taxa de Fusão do Arame**

(ESSERS, 1972, apud OLIVEIRA, 2006) – ESSERS, W. G; JELMORINI, G; TICHELAR, G. W. **Method of and Device for the Thermal Working and Processing of High-Melting-Point Materials**. United States Patent, Patent N. 3,830,997. Sep. 1972.

(ESSERS, 1981, apud OLIVEIRA, 2006) – ESSERS, W. G; WILLEMS, G. A. M; BUELENS, J. J. C; VAN GOMPEL, M. R. M. **Plasma-MIG welding – a new torch and arc starting method**. Metal Construction, january 1981, p. 36 – 42.

(GOHR JR. 2002, apud OLIVEIRA, 2006) – GOHR JR, R. **Novos métodos de controle da soldagem MIG/MAG**. Tese de Doutorado. UFSC – Florianópolis, 2002.

(JELMORINI, 1975, apud OLIVEIRA, 2006) – JELMORINI, G; TICHELAAR, G. W; ESSERS, W. G. **Welding characteristics of the plasma-MIG process**. Metal Construction, november 1975, p. 568 – 572.

(MAKARENKO, 2003, apud OLIVEIRA, 2006) – MAKARENKO, N. A. AND NEVIDOMSKY, V. A. **Thermal cycles in plasma-mig surfacing**. The Paton Welding Journal, 1/2003. pp 43 – 45.

(MATTHES, 2002, apud OLIVEIRA, 2006) – MATTHES, K; KOHLER, T. **Electrical effects and influencing quantities in the case of the hybrid plasma-MIG welding process**. Welding and Cutting, feb. 2002, p. 87 – 90.

(MODENESI, 2006) – MODENESI, P. J; MARQUES, P. V; SANTOS, D. B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. UFMG, 2006

(OLIVEIRA, 2006) – OLIVEIRA, M. A. **Desenvolvimento no processo híbrido Plasma-MIG para operações de soldagem e brasagem**. UFSC, Tese de Doutorado, Florianópolis, 2006

(QUITES, 1979) – QUITES, A. M; DUTRA, J. C. **Tecnologia da soldagem a arco voltagem**. EDEME, Florianópolis, 1979.

(REIS, 2007) – REIS, R. P; SCOTTI, A. **Fundamentos e prática da soldagem a plasma**. Artliber editora, São Paulo, 2007

(SCOTTI, 2008) – SCOTTI, A; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento melhor desempenho**. Artliber editora, São Paulo, 2008

(TON, 1975, apud OLIVEIRA, 2006) – TON, H. **Physical properties of the plasma-MIG welding arc**. Journal of Physics D: Applied Physics. Vol. 8, 1975, p. 922 – 933.

(VAN DER HEUVEL, 1978, apud OLIVEIRA, 2006) – VAN DER HEUVEL, G. M; JELMORINI, G; TICHELAAR, G. W. **Messung der Tropfentemperatur im Schweisslichtbogen und ihre Bedeutung in der Praxis**. DVS Bericht 50. Düsseldorf, 1978, s. 165 – 171.

(WWW.OXIBRAS.COM.BR, acessado em 28 de maio 2011) – EFEITO dos gases na penetração da solda, 2011.