UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

INVESTIGAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO MIG/MAG COM ARAME ADICIONAL

MIGUEL GUAYASAMIN MOGROVEJO

Florianópolis
Fevereiro-2014

MIGUEL GUAYASAMIN MOGROVEJO

INVESTIGAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO MIG/MAG COM ARAME ADICIONAL

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Jair Carlos Dutra, Dr. Eng.
Co-Orientador: Regis Henrique Gonçalves e Silva, Dr. Eng.

Florianópolis, fevereiro/2014

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

MOGROVEJO, MIGUEL GUAYASAMIN
INVESTIGAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO MIG/MAG COM ARAME ADICIONAL / MIGUEL GUAYASAMIN MOGROVEJO ; orientador, Jair Carlos Dutra ; coorientador, Regis Henrique Gonçalves e Silva. - Florianópolis, SC, 2014.
120 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, . Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. MIG-MAG. 3. Arame Frio. 4. Arame Quente. 5. Alta velocidade. I. Dutra, Jair Carlos. II. Silva, Regis Henrique Gonçalves e. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Miguel Guayasamin

INVESTIGAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO MIG/MAG COM ARAME ADICIONAL

Este Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre,e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 10 de fevereiro de 2014.

_____
Prof. Armando Albertazzi, Dr.Eng.
Coordenador do Curso

_____
Prof. Jair Carlos Dutra, Dr.Eng.
Orientador

_____
Eng. Regis Gonçalves e Silva, Dr.Eng.
Coorientador

Banca Examinadora:

_____
Prof. Carlos Enrique Niño, Dr. Eng.
UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina

_____
Prof. Orestes Estevam Alarcon, Dr.Eng.
(LABMAT/UFSC)

_____
Raul Gohr Jr., Dr. Eng.
IMC - Engenharia de Soldagem Instrumental e Automação

Aos soldadores que ainda utilizam suas mãos nesta arte, Também aos colegas da UFPA que tem iniciado um considerável avanço neste tema.

AGRADECIMENTOS

A meu avo Gustavo (in memoriam) quem motivou esta viagem para o Brasil, país generoso.

Aos meus pais, Gustavo e Teresa, pelo suporte e confiança oferecidos durante este trajeto.

Ao orientador e ao co-orientador, o Prof. Jair Dutra e Dr. Eng. Regis Silva por sua contribuição na realização deste trabalho.

Ao Dr. Eng. Raul Gohr Junior por suas acertadas contribuições desde o inicio deste projeto.

Aos Professores Carlos Niño e Augusto Buschinelli pela ajuda e motivação na conclusão deste trabalho.

Aos colegas e amigos Helington Direne, Felippe Khalil, Fabio Michelan, Reinaldo Fayal, Romário Nogueira, Julio Ribeiro, Diego Erdmann dos Santos, Rafael Polezi, Eduardo Bidesse, Luciano Cirino, Erwin Teichman, Jônathas Alves, Cleber Guedes, Cleber Marques, Roberto, Marcelo Okuyama, Marcia Thiel e toda a equipe do Labsolda pela colaboração em diversos aspectos deste trabalho.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica (PosMec), por proporcionar as condições necessárias para a realização deste trabalho e à CAPES pela bolsa de estudo.

A Elena pelo carinho e incomparáveis momentos nesta ilha. Aos amigos José, Diana, Monica, Adriana, Byron, América, Carlos, Natalia e tantos outros amigos nos momentos sérios e na descontração.

RESUMO

Este trabalho apresenta as relações e aspectos técnicos para desenvolvimento de uma variante do processo MIG/MAG que procura o incremento da produtividade sem comprometer a qualidade. A base da questão é o fato de que no processo MIG/MAG na configuração convencional, apesar de suas nuances de versões como o MIG/MAG CC- ou MIG/MAG CA, a relação entre a adição de material e a corrente de soldagem, e dessas com a estabilidade e produtividade do processo, é muito interdependente. Isto produz restrições de aplicação numa série de tipos de juntas e peças. Alguns exemplos estão na soldagem com *gaps* variáveis, chapa fina, soldagem de raiz ou espessuras dissimilares nas quais há tendência de falta de fusão ou penetração excessiva, escorrimento da poça ou *"burn-through"*.

Formas de contornar algumas destas limitações estão nos desenvolvimentos de processos híbridos, como o Plasma-MIG, e na utilização de arames duplos nas versões de potencial único e potencial isolado, que ampliam as opções de balanceamento entre a intensidade de energia e quantidade de material aportado. Entretanto, estas inovações, apesar de resolverem alguns problemas pontuais, criam novas dificuldades, seja por aumentarem a complexidade das tochas e sistemas de controle, seja por não atenderem adequadamente a conjugação entre a corrente, a quantidade de material de adição, a geometria requerida da junta e a complexidade geral do equipamento. Assim, observando que o arco MIG/MAG produz calor que não somente funde o arame, apresentando uma determinada eficiência, e que muitas vezes aquece e funde a peça além do que é necessário, são apresentadas distintas configurações para adição de um arame (sem arco) dentro da poça formada pelo arco principal.

Este trabalho viabiliza e aborda os efeitos da inserção de arame adicional frio (*cold wire*) e arame adicional quente (*hot wire*) sobre diferentes configurações como posicionamento relativo, distinta polaridade e o uso de corrente alternada. Os resultados mostraram a possibilidade de incrementar a produtividade sem comprometer a qualidade, ainda reduzir o calor aportado e a fusão excessiva das peças. A inserção de arame pela frente do arco é adequada para processos de revestimento. A inserção do arame quente na poça é orientada a processos de união. Esta última configuração reduziu a possibilidade da poça de escorrer em determinadas juntas e por outro lado permitiu ultrapassar a velocidade de soldagem em que o MIG/MAG

convencional apresentaria o fenômeno do *humping*, alcançando 5m/min de velocidade de soldagem em deposição sobre chapa plana.

Palavras-chave: MIG-MAG; Arame Frio; Arame Quente; Alta velocidade; MIG/MAG Curto Circuito Hibrido.

ABSTRACT

This development based on GMAW presents relations of an alternative that explores increase in productivity without compromising the quality. The fact is that, in conventional GMAW, close relationship behavior between wire consumption and welding current restricts high productivity modes on many welding configurations. Although on GMAW could be improved some configurations like the use of negative polarity or AC current, this relation is still dependant. Some examples are: variable gap joint, thin sheet, root welding or dissimilar thick joints that could present excessive piece melting, melting pool drop or burn-through.

Some alternatives to contour these limitations are on the use of hybrid methods like Plasma-GMAW, or Tandem-GMAW with isolated or non isolated tips configurations. While these procedures could resolve some problems, in the other hand presents an increase in torch/equipment complexity or not accomplishing a well balance between current and added material onto a required welding joint geometry. Based on GMAW arc heat not only melts feed wire but also melts pieces more than required, here are exposed some configurations of adding an extra wire into the welding pool.

This work presents some effects of hot/cold wire insertion on different configurations like relative location, +/- or AC current for hot wire. Some of the results are expressed on productivity increase by keeping the quality and also reduced melt and heat transfer to the piece. Front wire insertion is suggested for coating procedures. Back wire insertion is recommended for joint welding. This configuration reduces welding pool drop on horizontal position, but also overcome the welding speed at which humping phenomena is presented on conventional GMAW, reaching up to 5 m/min. on flat deposition.

Key words: GMAW; Cold-wire; Hot-wire; High welding speed; Hybrid Short Circuit GMAW.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho da inserção do arame adicional na frente do arco MIG/MAG. Adaptado de [6]. 29
Figura 2 - Velocidade de fusão do arame-eletrodo ER70S-6 1.2 mm com relação à corrente média de soldagem. Adaptado de [9]. 31
Figura 3-a. Modos de transferência adotados pela IIW [11]. 3- b. Mapa de transferências (I-U), [10]. 32
Figura 4-a. Mapa de regularidade (I-U) do processo MIG/MAG convencional. Aço carbono 1,2 mm, gás: Ar + 20% CO_2, Adaptado de [12]. 4-b. Característica estática do arco para MIG/MAG, arame 1.0mm, Ar + 25% CO_2. Adaptado de [13]. 33
Figura 5 - Esq. Mapa de transferência metálica para MIG/MAG, arame 1,2mm, Ar-8%CO2.[14]. Dir. Recomendação para seleção do modo de transferência do processo MIG/MAG de acordo com a espessura da chapa a ser soldada. [15]. 33
Figura 6 - Fotografias do arco voltaico em CC+ (A) e em CC- (B). [18]. 35
Figura 7 - Taxa de fusão CC- e CC+, para distância bico de contacto peça de 25 mm e arame de 1,2mm ER70S-6. [5] 36
Figura 8 – Relação entre % EM e Penetração para chapa 4,7 mm.[22] 37
Figura 9 - Esq. Detalhe duma tocha MIG/MAG com um bico convencional. Dir. Bico da marca MIGfast com inserto cerâmico e único ponto de contato elétrico. [23] 39
Figura 10 - Esq. Esquema do processo MIG/MAG com o dispositivo de pré-aquecimento. Dir. Se observa significativa redução na penetração e incremento no reforço na utilização de corrente de pré-aquecimento (b) comparado ao MIG/MAG convencional (a). [24] 40
Figura 11. A) Fotografia do MIG/MAG convencional no modo goticular e reduzido comprimento de arco. B) ForceArc. Cada fotografia acompanhada do oscilograma U-I. Modificado de [25]. 41
Figura 12. A) Mapa U-I e os modos de transferência adotados pela EWM. [25]. B) Região de estabilidade num mapa (U-I) RapidArc (Lincoln). Adaptado de [26] 42
Figura 13 - Diagrama da tocha Plasma-MIG com seus principais componentes. [28]. 43
Figura 14 - Parâmetros geométricos em função da corrente Plasma. [28]. 43
Figura 15 - Influência da corrente no eletrodo e no plasma sobre a velocidade do arame ER70S6, 1,2 mm. Modificado de [27]. 44

Figura 16 - Representação esquemática do processo MIG/MAG com duplo arame, A. Potencial Único, B. Potencial Isolado. [29]..... 45
Figura 17 - A.Tocha de potencial único (modelo fabricado pela Abicor-Binzel), com seu respectivo detalhe. B. Tocha de potencial isolado (fabricado pela TBI), com detalhe do bocal e bico de contacto. [29]. .. 45
Figura 18 - Exemplo da utilização do processo com duplo arame com disposição em serie e paralelo. a) Em revestimentos, b) em soldagem de uma junta de topo com cobre-junta, c) Soldas de filete, d) soldas de topo. [29]..... 46
Figura 19 - Evolução dos injetores de arame não energizado na UFPA (a) 2005; (b) 2007, (c) 2008 e (d), 2009. [45]. 49
Figura 20 – A. O proceso MIG/MAG e as linhas de fluxo normais. Na Figura B, um exemplo da formação do *Humping*, mostra a parede que forma o retrocesso da poça e a lombada que fica por trás do arco. Adaptado de [48]..... 50
Figura 21 - A. Tipo de *Humping* BCM normalmente apresentada no processo MIG/MAG. B. o tipo de *humping* GRM, normalmente apresentada no processo TIG. Adaptado de [50]. 52
Figura 22 - A. Influencia da Vs e I sobre a aparência do cordão de solda. Adaptado de [51]. B. Mapa determinado entre a perfuração e a falta de fusão para soldagem de junta sobreposta (2.4 mm), relacionado pela Vs e Va. Adaptado de [52]. 53
Figura 23 - A.Modelo de geração de fumos (gás de proteção Ar+ 8%CO2, ER70S-3 1.2 mm). Adaptado de [16]. B, diferença da taxa de geração de fumos entre o GMAW e o GMAW-P. Adaptado de [17] ... 55
Figura 24 - A) Disposição de dois eletrodos em paralelo, B) o campo magnético gerado e C) a atração dos arcos no caso da utilização de corrente no mesmo sentido nos eletrodos. Adaptado de [56]. 56
Figura 25 - Iteração entre os campos magnêticos produzidos por eletrodos soldando simultaneamente. [57]. 57
Figura 26 - A)Comportamento da poça e geometria do cordão de solda dependendo da configuração elétrica em soldagem com arco submerso[60]. B) Sequencia de fotografias em soldagem MIG/MAG tandem CCC, é vissivel acumulação de massa entre os eletrodos [61]. 58
Figura 27 - Esquerda, distintas seções dos cordões de solda de acordo ao posicionamento do cabo terra e a largura da chapa. Direita, relação da largura do cordão contra a largura da chapa e o posicionamento do cabo terra. Adaptado de [60]. 59
Figura 28 - Dois modos básicos de transferência no TIG alimentado. A. transferência globular; B. Transferência por ponte continua. [62]..... 60

Figura 29 - Distintos modos de transferência Plasma com alimentação de arame frio [4]. 61
Figura 30 - TIG alimentado com arame quente. Destaca-se o modo de transferência do arame como ponte sólida. Também a mesma polaridade no eletrodo TIG como no arame quente. Adaptado de [65]. 62
Figura 31 - Mapa comparativo da taxa de fusão para ER70S-6 de 1,2 mm contra outros processos derivados do MIG/MAG. Também inserido a faixa na qual foram realizadas distintas experiências MIG/MAG com adição de arame, Adaptado sobre [9]. 63
Figura 32 - Gabarito empregado para acople das tochas. 67
Figura 33 - Sistema de aquisição de dados portátil [66]..... 69
Figura 34 - A) Disposição da caixa acondicionada para a câmera incluindo o vidro protetor com filme adesivo de policarbonato e filtros polarizados. B) Distancia aproximada do arco. C) Vista frontal. D) Objetivo visualizado na tela da câmera. 70
Figura 35 - Efeito do *cast* e *hélix* no arame. [20] 72
Figura 36 - Diagrama das variáveis de posicionamento do arame adicional (preto) relativas ao arame com arco (vermelho). 75
Figura 37 - A) Detalhe da junta sobreposta, B) Detalhe da junta de canto com folga variável. 76
Figura 38 - Sequência de inserção de arame energizado na poça. Observa-se na fotografia do meio os respingos produzidos quando o arame ainda frio é empurrado, dobrado e levado dentro do arco. Os gráficos dos extremos mostram ausência de respingos, antes de ser inserido e em regime. 78
Figura 39 - i) Diagrama da inserção do arame adicional antes e depois da inserção, nos tempos -A-e -C-. ii) Oscilograma da tensão dos arames e definição dos tempos -A-B-C-. iii) Oscilograma da corrente. Em azul os valores para o eletrodo com arco, em verde os valores para o arame adicional. 79
Figura 40 - Configurações aplicadas na inserção do arame frio..... 80
Figura 41 - Proporcionalidade entre consumo de arame adicional e potencia empregada para distintos DBCP. Também a relação teórica para a mesma quantidade de arame atingir os 1300°C desde 20°C..... 86
Figura 42 - Modelo ajustado em base da minimização do erro quadrático médio e dados dos ensaios. 88
Figura 43 - Comportamento da resistência vs. corrente para distinto DBCP. 88
Figura 44 – A. O diagrama para o modelo geral. B. O modelo que inclui a variação da resistividade de contato Rc devido à dinâmica entre o arame e a corrente. 89

Figura 45 - Modelo proposto, para consumo do arame quente. Ajustado por minimização do erro quadrático médio 90
Figura 46 - Evento de abertura de arco. O controle consegue, neste caso, extinguir o arco em aproximadamente 20 ms. 91
Figura 47 - Sopro magnético de acordo à polaridade empregada no arame quente. 93
Figura 48 - Ensaio com arame quente em 50 Hz. A dinâmica do balanço do arco é maior do que a transição da corrente alternada. A corrente do arame quente em verde, a corrente do arco em azul. Do lado direito os parâmetros empregados..... 95
Figura 49 - Oscilograma da corrente CA aplicada ao arame quente em 305 Hz. A corrente pulsada do arco não foi inserida para evitar saturação das imagens. Do lado direito os parâmetros empregados. 96
Figura 50 - Configuração orientada a processos de revestimento..... 99
Figura 51 - Macrografia. Geometria com 12% diluição, poderia ser orientada a processos de revestimento. Na direita os parâmetros empregados. 100
Figura 52 - Configuração orientada a processos de união. 100
Figura 53 - Mordedura produzida quando desligado o arame adicional aproximadamente 50 mm antes do final da chapa. Na direita os parâmetros empregados..... 101
Figura 54 - Diferençada forma da poça e o efeito do sopro magnético no distanciamento do arame adicional. Na direita os parâmetros empregados. 103
Figura 55 - Comportamento do arco (em azul) frente ao desalinhamento do arame adicional (em vermelho) no uso de distinta polaridade. Abaixo os parâmetros empregados. 105
Figura 56 - Perfil de dureza HV2. Nota-se o incremento da dureza nas punções sobre a mancha. Os valores menores correspondem à peça, os intermediários à solda. 106
Figura 57 - Resultado do MEV. Comparativamente pode se apreciar a similaridade na composição química das amostras sobre a mancha e a solda, pontos A e B respectivamente, estas levemente distintas duma amostra da composição do arame ER70S-6 sem fundir, ponto C. 106
Figura 58 - Mapa comparativo para o arame ER70S-6 de 1,2 mm. Inclui a faixa (listrada) na qual foram levantadas as experiências com MIG/MAG com adição de arame frio/quente. 107
Figura 59 - Aproximação da faixa na qual o MIG/MAG com arame quente se desempenha e sua estimativa a este ser um processo frio. Adaptado de [25]..... 108

Figura 60 - Configuração detalhada do posicionamento da tocha para soldagem de junta sobreposta na posição horizontal. Na direita os parâmetros de regulagem de cada fonte. 111
Figura 61 - Configuração detalhada do posicionamento da tocha para soldagem de junta de canto. Na direita os parâmetros de regulagem de cada fonte. 112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variantes do processo MIG/MAG estudadas no LABSOLDA/UFSC, para incremento da produtividade. 27
Tabela 2 - Estudos preliminares sobre adição de arame no MIG/MAG..... 47
Tabela 3 - Principais Características do Sistema de Aquisição de Dados Portátil. 69
Tabela 4 - Características principais da câmera infravermelha. 71
Tabela 5 – Parâmetro inicialmente empregado para o eletrodo com arco. 77
Tabela 6 - Distintos modos de adição de arame frio e respectivas progressões da Va..... 81
Tabela 7 - Transferência do arame adicional entre um e dois m/min.... 82
Tabela 8 - Estimação da temperatura de inserção do arame quente..... 84
Tabela 9 - Ensaio da energia empregada para aquecimento do arame adicional. 85
Tabela 10 - Relação máxima de adição de arame quente recomendável para algumas configurações de posição e polaridade..... 94
Tabela 11 - Distintos modos de adição de arame quente e suas características principais. 98
Tabela 12 - Comparação do resultado da soldagem de Junta sobreposta..... 111
Tabela 13 - Comparação do resultado da soldagem da Junta de canto. 112

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AWS : American Welding Society
B: Campo Magnético (T).
BCM: Beaded Cylinder Morphology.
C: Consumo do arame (m/min).
CA : Corrente Alternada.
CC- : corrente continua com polaridade negativa.
CC+ : corrente continua com polaridade positiva.
CCC : Curto Circuito Controlado.
CCF: Curto Circuito Forçado.
Cp: Calor específico (J/kg K).
Cq: Consumo de arame quente (m/min).
DCEN : Direct Current Electrode Negative.
DCEP : Direct Current Electrode Positive.
DBCP: Distância bico de contato peça.
DWOA: Double wire one arc.
F: Força (N).
GMAW: Gas metal arc welding.
GRM: Gouging Region Morphology.
HV2: Teste de dureza.
I: Corrente (A);
I 1:X relação corrente no arco:corrente no arame quente.
Icc: Corrente de curto circuito.
Ief: Corrente eficaz do arco (A)
Ieff: Corrente eficaz.
Im: Corrente media do arco (A).
In: Corrente negativa.
L: Extensão do eletrodo (mm).
$\dot{m}$: Taxa de alimentação de arame (kg/s).
MIG/MAG PS: Processo MIG/MAG Pulsado sincronizado.
MIG/MAG: Metal Inert Gas/Metal Active Gas.
P: Potência (W).
Rc: Resistência de contato.
rms: root mean square
SAP : Sistema de aquisição portátil.
STC : Short Transfer Circuit.
T : Temperatura (°C).
Tf: Taxa de fusão (kg/h).
TIG: Tungsten Inert Gas.
U: Tensão (V).

Ua: Tensão do arco.
Ucc: Tensão de curto circuito.
Ueff: Tensão eficaz.
Va: Velocidade de Arame (m/min).
Va 1:X Relação Va no arco: Va no arame adicional.
Vs: Velocidade de soldagem (m/min).
α: Constante relacionada ao calor gerado pelo arco e também da polaridade (kg/A.h).
β: Constante dependente da resistividade e do diâmetro do arame (kg/mm.A^2.h).
μ_0 : Permeabilidade magnética do ar (Tm/A).

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 25

2 FUNDAMENTAÇÃO TEORICA..... 29
2.1 TAXA DE FUSÃO, TRANSFERÊNCIA METÁLICA E ESTABILIDADE DO PROCESSO MIG/MAG..... 30
2.2 VARIANTES DO MIG/MAG 34
2.2.1 MIG/MAG com Polaridade Direta ou CC- 34
2.2.2 MIG/MAG com Corrente Alternada ou CA 36
2.2.3 Manipulação do *Stick Out* 38
2.2.4 Curto Circuito Forçado..... 40
2.2.5 Plasma-MIG. 42
2.2.6 Tandem eTwin MIG (Potencial único e Potencial Isolado) 44
2.3 PROCESSO MIG/MAG COM ADIÇÃO DE ARAME 47
2.4 OUTRAS CONSIDERAÇÕES RELATIVAS AO PROCESSO MIG/MAG E ADIÇÃO DE ARAME..... 50
2.4.1 Humping..... 50
2.4.2 Perfuração / Falta de Penetração 52
2.4.3 Geração de Fumos 54
2.4.4 Forças Magneticas 55
2.4.5 Transferência Metálica de Arame Adicional 59
2.5 MAPA COMPARATIVO..... 63

3. OBJETIVOS 65

4. MATERIAIS E METODOLOGIA..... 67
4.1 EQUIPAMENTOS 67
4.1.1 Gabarito para Acoplamento de Duas Tochas MIG/MAG..... 67
4.1.2 Deslocador 68
4.1.3 Fontes de Soldagem 68
4.1.4 Sistema de Aquisição Portátil (SAP)..... 68
4.1.5 Registro da Imagem..... 69
4.1.6 Câmera Infravermelha..... 71
4.1.7 Desentortador de Arame 71
4.2 MATERIAIS..... 72
4.3 METODOLOGIA 73

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES 77

5.1 PARÂMETROS INICIAIS E INFLUÊNCIA DO SEGUNDO ARAME SOBRE O ELETRODO PRINCIPAL. 77
5.2 INSERÇÃO DO ARAME FRIO 80
5.3 INSERÇÃO DE ARAME QUENTE..... 83
5.3.1 Aquecimento por Efeito Joule 83
5.3.2 Modelo para Aquecimento Limite do Arame Adicional. 87
5.3.3 Controle do Estado de Curto Circuito..... 90
5.3.4 Sopro Magnético devido ao Efeito de Campo 92
5.3.4.1 Polaridade Utilizada no Arame Quente..... 92
5.3.4.2 Uso da Corrente Alternada..... 94
5.3.5 Posição Relativa do Arame Quente em relação ao Arco 97
5.3.6 Inserção do Arame num Ângulo Aberto e Pela Frente do Arco 99
5.3.7 Inserção do Arame num Ângulo Fechado e Trás do Arco 100
5.4 OBSERVAÇÕES NÃO PLANEJADAS..... 104
5.5 MAPA COMPARATIVO 107
5.6 APLICAÇÕES PRÁTICAS 109
5.6.1 Junta Sobreposta 110
5.6.2 Junta de Canto..... 111

CONCLUSÕES 113
RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 114

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÂFICAS 115

1. INTRODUÇÃO

O processo MIG/MAG é utilizado amplamente na indústria por apresentar uma vantagem conjugada entre produtividade, flexibilidade e facilidade de automação. Ainda hoje, apesar de ser um processo introduzido majoritariamente na década dos 1960 e atualmente concorrer com novos processos de soldagem, sobretudo processos híbridos e adesivos, mantém a vanguarda na soldagem a arco [1]. Assim este processo é amplamente empregado na indústria de petróleo e gás, naval e automobilística.

No setor automobilístico, atualmente 80% das aplicações robotizadas são empregadas para soldagem de união, e dentro desta faixa, 70% utiliza processos de soldagem MIG/MAG[1]. Assim, mais da metade dos robôs são destinados para este tipo de aplicação. Tal cenário motiva o interesse da indústria em novos desenvolvimentos que visem melhorar o desempenho do processo MIG/MAG orientados a aplicações automatizadas, especialmente no incremento de produtividade.

Uma característica da soldagem MIG/MAG convencional é a elevada dependência entre quantidade de material de adição e corrente imposta no processo, ou taxa de fusão. Tal fato muitas vezes restringe a aplicação deste processo, pois em virtude do incremento da deposição de material, a energia requerida para sua fusão termina por comprometer, tanto a estabilidade do processo, como as peças a serem soldadas. O contrário também acontece na tentativa de fundir sem adicionar material, ou variar a taxa de adição. Desta forma, quando se aumenta a adição de material, para, consequentemente, aumentar a velocidade de soldagem (Vs) e a produção, termina-se por comprometer a qualidade do cordão de solda. Esta relação produção-qualidade não somente está ligada ao cordão de solda como resultado final do procedimento, como também ao ambiente de trabalho na geração de fumos e respingos. Podem-se citar alguns efeitos que alteram a qualidade do cordão de solda, como a aderência de respingos, escorrimento da poça, perfuração das peças, a formação de mordedura e o *humping*. Estas variáveis são tratadas nos capítulos seguintes.

Apesar de existirem alternativas que permitem manipular a taxa de fusão via fenômenos físicos do arco MIG/MAG, como na utilização do CC-, CA ou aditivação do arame, essas variantes podem apresentar

---

[1] TEICHMANN, E. Especialista em soldagem automotiva. Comentários sobre as principais aplicações dos robôs na indústria.

problemas, como instabilidade no processo ou complexidade do equipamento, sem atingir uma considerável variação na taxa de fusão.

A pesquisa vislumbra adição de arame frio ou arame pré-aquecido por efeito Joule ao processo MIG/MAG, como uma possibilidade para modificar a relação entre quantidade de material depositado e a corrente do processo base. Este artifício permitiria aprimorar algumas aplicações ou viabilizar outras, assegurando a estabilidade do processo e gerando uma geometria de cordão de solda mais adequada para uma determinada junta, além de melhorar algumas características fundamentais do processo, como incremento da velocidade de soldagem, tolerância de variações na junta ou redução de distorções. Além do mais, ela favoreceria também a eliminação de trabalho posterior sobre a peça e manutenção do equipamento, e diminuiria a contaminação do ambiente, reduzindo as emissões tanto voláteis como sólidas. Deste modo, em comparação com outras variantes MIG/MAG de alta produtividade, essa técnica traria benefícios diretos, tanto para o operário, que trabalha em condições mais limpas e seguras, quanto para a empresa, que diminui os tempos de parada ocasionados por manutenção e limpeza das tochas e manipuladores.

Esta investigação aborda o processo MIG/MAG com adição de arame em aplicações de união com arames de composição idêntica. Contudo, com o propósito de contextualizar melhor esse processo, cabe citar outras vantagens mencionadas por alguns autores, como, por exemplo, a possibilidade de este ser utilizado para soldagem de revestimento, modificação de ligas com uso de diferentes arames, variação dos ciclos térmicos, dentre outras.

A pesquisa também é apresentada em decorrência de trabalhos prévios realizados no LABSOLDA/UFSC, cronologicamente apresentados na Tabela 1. Estes distintos desenvolvimentos de técnicas especiais para aumentar a produtividade no processo MIG/MAG são devidamente detalhados no capítulo I deste trabalho.

Tabela 1 - Variantes do processo MIG/MAG estudadas no LABSOLDA/UFSC, para incremento da produtividade.

ANO	TIPO	TITULO	AUTOR
1999	Diss. UFSC	MIG/MAG duplo arame potencial único.[2]	Aldo M. Ramirez G.
2002	Tese UFSC	Aplicação do Processo MIG/MAG Pulsado com Duplo Arame e Potenciais Isolados em Soldagens de Revestimento. [3]	Marcelo Motta
2006	Tese UFSC	Desenvolvimentos no Processo Híbrido Plasma-MIG para Operações de Soldagem e Brasagem.[4]	Moises Alves de Oliveira
2011	Diss. UFSC	Desenvolvimento de tecnologias no processo MIG/MAG para aumento de produtividade e melhoria da qualidade mediante o uso da polaridade negativa.[5]	Eduardo Bidese

Da mesma forma que os trabalhos citados, o processo estudado neste trabalho será levado à prática, considerando-se esta como uma etapa que o põe em prova e valida o desenvolvimento. Para tanto, foram considerados dois tipos de juntas para estudo, uma utilizada na indústria agrícola e outra na automotiva, e foram escolhidas por apresentarem problemas atuais, para os quais o presente desenvolvimento fornece soluções apropriadas.

A primeira junta a ser estudada consiste em uma junta de canto, aplicada na fabricação de rodas de tratores empregados no cultivo de arroz. No modo em que atualmente são montadas essas peças, tem-se uma tolerância relativamente ampla para a junta a ser soldada (entre 0,0mm a 1,5 mm), ou aproximadamente 75% Max. da espessura da chapa de 2,00 mm. Esta folga na junta favorece ao "*burn-through*" ou perda da sustentação da poça. Dentro do LABSOLDA, atualmente, técnicas de soldagem com movimentos de ida e volta (*switch-back*), movimentos de tecimento (ou oscilação da tocha) e limitação de corrente vem sendo utilizados para solucionar ou amenizar estes problemas. Espera-se no futuro gerar uma comparação e determinação de faixas de aplicação para estas opções.

Outra soldagem que será levada à prática é a união de juntas sobrepostas de 2 mm de espessura. Esse tipo de junta é frequentemente encontrado em união de peças complementares conformadas por embutimento. Este processo, comum na indústria automotiva, sobretudo na produção de veículos particulares, normalmente é robotizado e

aplicado com Tandem-MIG. Contudo, tem-se visto que este procedimento pode apresentar 40% de perdas de material de adição, devido ao escorrimento da poça de fusão[2], além de gerar uma quantidade excessiva de fumos.

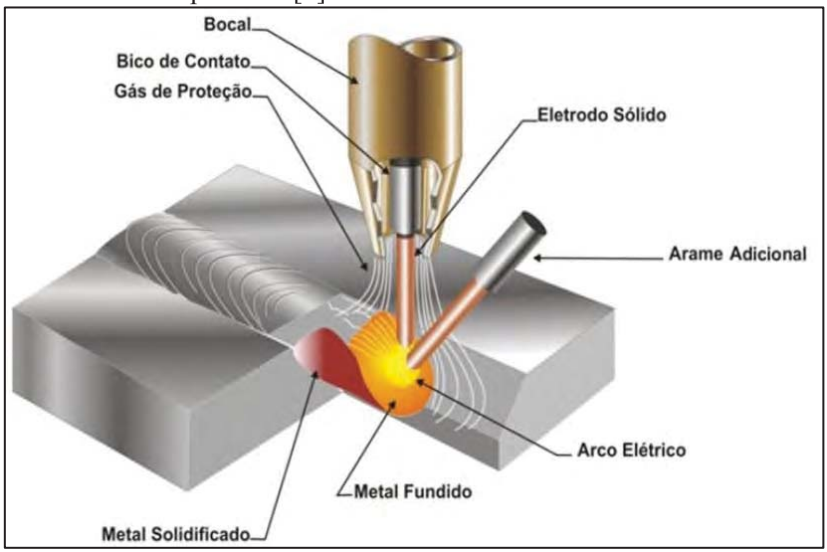
O trabalho, portanto, pretende desenvolver uma técnica MIG/MAG com arame adicional para dilatar a faixa na qual normalmente interagem a energia utilizada e a quantidade de material aportada. Adequando-as, neste caso, para o incremento na produtividade na soldagem de espessura menor a 2mm ou, espessura dissimilar, ainda com considerável tolerância de afastamento entre os membros a serem soldados. Também promovendo a redução ou eliminação das perdas de material depositado e diminuição na emissão de fumos.

[2] Relatório apresentado por Teichman E., "Soldagem Duplo Arame Berço Motor Logan/Sandero". Novembro – 2009.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEORICA

A adição de arame ao processo MIG/MAG com adição de arame é mostrado esquematicamente na Figura 1. Nela são mostrados os principais elementos que o compõem, o eletrodo principal no qual o arco voltaico se estabelece, e o arame secundário frio/quente introduzido na poça. A Figura mostra o caso no qual o arame é inserido pela frente do arco.

Figura 1 - Desenho da inserção do arame adicional na frente do arco MIG/MAG. Adaptado de [6].



Inicialmente este capítulo tratará questões inerentes ao processo MIG/MAG e a dependência entre corrente fornecida e arame fundido. Nele são apresentados e comparados distintos processos derivados do MIG/MAG que modificam esta relação corrente/material aportado dentro de sua faixa normal de operação, e também são apresentados processos que incrementam a produtividade, como o Tandem MIG, entre outros. Serão tratados, também, alguns efeitos relativos ao incremento de produtividade neste processo, como o fenômeno do *humping*, *burn-through* e geração de fumos.

Também se apresenta um resumo de trabalhos prévios e relativos à adição de arame no processo MIG/MAG. Tanto os processos derivados do MIG/MAG, mencionados anteriormente, como dos

trabalhos com adição de arame, majoritariamente realizados na Universidade Federal do Pará (UFPA), são colocados num mapa comparativo da taxa de fusão.

2.1 TAXA DE FUSÃO, TRANSFERÊNCIA METÁLICA E ESTABILIDADE DO PROCESSO MIG/MAG

Como foi apresentada na introdução, uma característica que rege o processo MIG/MAG é a relação entre o consumo de arame e a corrente imposta, designada como taxa de fusão. Esta relação modelada por Lesnewich[7], mostrada na Equação 2-1, se compõe de dois termos, o primeiro e o mais significativo tem relação com o calor aportado pelo arco, e o segundo com o calor gerado por efeito Joule sobre a extensão do eletrodo. Halmoy[8] apresenta outra variante deste modelo aplicada à corrente pulsada, modelado na Equação 2-2.Ele mostra que o calor aportado pelo arco e o calor aportado por pré-aquecimento do arame têm melhor correspondência com a corrente média e a eficaz, respectivamente.

$$Tf = \alpha \cdot I + \beta \cdot L \cdot I^2 \qquad \text{Equação 2-1}$$

$$Tf = \alpha \cdot Im + \beta \cdot L \cdot Ief^2 \qquad \text{Equação 2-2}$$

Tf: Taxa de fusão (kg/h);

α: Constante relacionada ao calor gerado pelo arco, que depende da polaridade (kg/A.h);

β: Constante dependente da resistividade e do diâmetro do arame (kg/mm.A^2.h);

I: Corrente (A);

Im: Corrente media do arco (A);

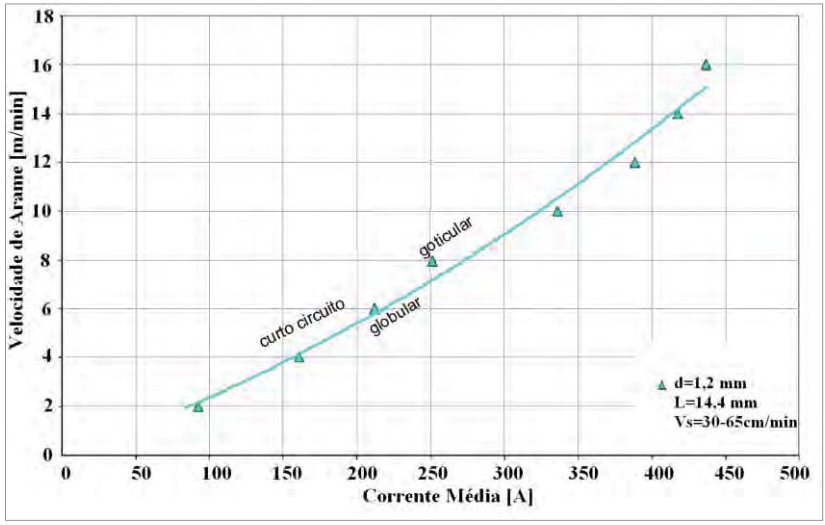
Ief: Corrente eficaz do arco (A);

L: Extensão do eletrodo (mm).

A influência da corrente, além de definir a quantidade de material depositado ou a Velocidade do Arame (Va), neste caso, como mostrado na Figura 2, ela determina o modo com que se transfere o metal líquido à poça. Na proteção majoritária de argônio (por exemplo, Ar + 8% de CO_2) de forma simples podem ser caracterizados três modos de transferência, curto circuito, globular e goticular axial. Esses tipos de transferência têm relação com as forças que interagem na formação e no destacamento das gotas metálicas formadas na extremidade do eletrodo. As duas principais forças que comandam a transferência são a tensão superficial e as Forças de Lorentz (dependentes da corrente) com sua

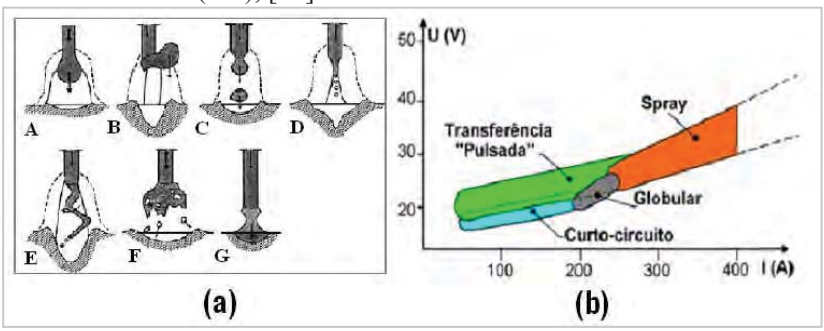
componente axial. Outras menos influentes são as forças de arraste do gás e o peso próprio da gota, assim como a pressão do arco, [1].

Figura 2 - Velocidade de fusão do arame-eletrodo ER70S-6 1.2 mm com relação à corrente média de soldagem. Adaptado de [9].



De modo específico foi adotado pelo IIW (*International Institute of Welding*) os seguintes modos de transferência mostrados na Figura 3-a. A: globular, B: globular repelida, C: goticular axial ou *spray*, D: goticular com elongamento, E: goticular rotacional, F: gotas explosivas, e G: curto-circuito. Destes modos a goticular e goticular alongado, C e D respectivamente, são os que apresentam melhor relação entre produtividade e qualidade no processo MIG/MAG convencional, para as aplicações já descritas na introdução. Assim, em se tratando do eletrodo principal, é previsível que estará entre estes dois regimes de transferência. Na Figura 3-b o mapa U-I mostra as faixas nas quais acontecem as diferentes modalidades de transferência metálica, mesmas faixas nas o MIG/MAG é empregado normalmente. Os valores do esquema são referidos à utilização de arame de aço carbono 1,2 mm em atmosfera de gás: 92%Ar + 8% CO_2.

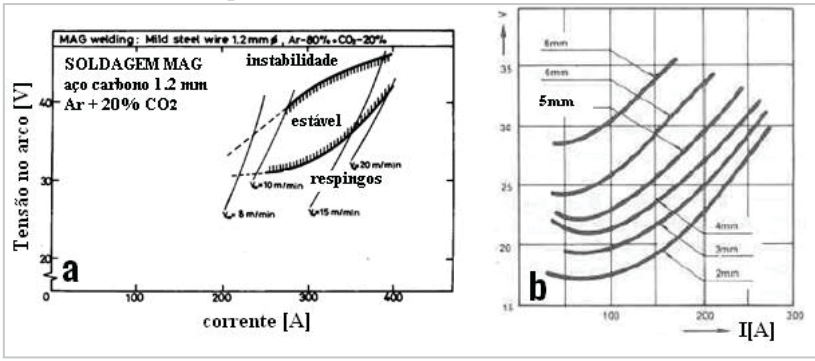
Figura 3-a. Modos de transferência adotados pela IIW [11]. 3- b. Mapa de transferências (I-U), [10].



De modo análogo ao gráfico anterior, da Figura 3, Matsuda [12] estabelece uma zona de estabilidade num gráfico tensão (U)-corrente (I), na Figura 4-a. O autor determina uma região na qual o MIG/MAG é estável, entre dois limites nominados como zona de *instabilidade* e zona de *respingos*. A zona de *instabilidade* é marcada por rotação do arco ou movimentação irregular do mesmo pudendo se apresentar transferência irregular. Estes ensaios foram resultados de filmagem de alta velocidade e numa atmosfera de Argônio com 20% de CO_2.

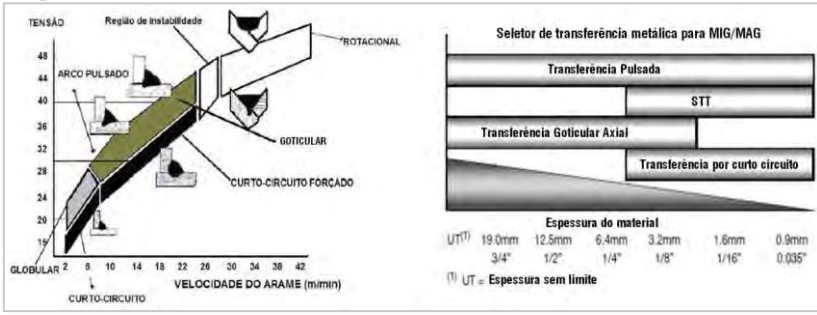
No exemplo colocado por Matsuda, na mesma figura, basta com variar a altura da tocha em relação à peça e modificaríamos tanto a tensão como o comprimento do arco, para corrente fixa e velocidade de arame fixa. Esta variação colocaria o processo na da região de *respingos*, *estável* ou de *instabilidade*. Assim outra variável da estabilidade é o comprimento do arco. Para um mesmo comprimento do arco conhecido como "característica estática do arco", Dutra [13] mostra esta relação para uma mistura de Ar + 25% CO_2 na Figura 4-b. De fato, no ambiente do laboratório normalmente o processo MIG/MAG no modo Goticular é empregado num comprimento do arco de aproximadamente 5 mm. Assim a relação entre corrente, transferência metálica, e comprimento do arco determina tanto a estabilidade do processo MIG/MAG como sua aplicabilidade.

Figura 4-a. Mapa de regularidade (I-U) do processo MIG/MAG convencional. Aço carbono 1,2 mm, gás: Ar + 20% CO_2, Adaptado de [12]. 4-b. Característica estática do arco para MIG/MAG, arame 1.0mm, Ar + 25% CO_2. Adaptado de [13].



A seguinte Figura 5 apresenta os gráficos que relacionam o modo de transferência metálica com a aplicação e servirão para expor algumas das limitações características do processo MIG/MAG convencional. Salienta-se que são recomendações apenas indicativas, que, genericamente, mostram algumas situações de melhor adequação.

Figura 5 - Esq. Mapa de transferência metálica para MIG/MAG, arame 1,2mm, Ar-8%CO2.[14]. Dir. Recomendação para seleção do modo de transferência do processo MIG/MAG de acordo com a espessura da chapa a ser soldada. [15].



A característica do modo curto-circuito de baixa potência de soldagem é adequada para a união de chapas finas em todas as posições de soldagem. Contudo, no modo curto-circuito tem-se a menor velocidade de alimentação de arame. No caso específico da Figura 5

(esquerda), o gráfico mostra velocidades de arame em torno de 6 m/min. Em outras palavras, para a soldagem de chapas finas, comumente, se usa um modo de transferência menos produtivo para se evitar a perfuração da chapa. Além disso, o regime de transferência metálica por curto-circuito tem maior tendência a gerar respingos e fumos, comparado à transferência por voo livre próximo da corrente de transição. [16,17].

No outro extremo, tem-se a transferência goticular, que não gera respingos e desenvolve-se em velocidades de alimentação de arame maiores (entre 6 m/min e 26 m/min segundo o gráfico da Figura 5. Contudo, devido à grande potência de soldagem gerada por este modo de transferência metálica, este é majoritariamente orientado à soldagem de chapas de aço espessas e na posição de soldagem plana.

Com a intenção de contornar as limitações do processo MIG/MAG convencional, foram desenvolvidas algumas técnicas que tentam unir as características desejáveis dos dois modos de transferência. Algumas são apresentadas a seguir.

2.2 VARIANTES DO MIG/MAG

2.2.1 MIG/MAG com Polaridade Direta ou CC-

O processo MIG/MAG é, normalmente, utilizado na condição conhecida com CC+ ou polaridade inversa (o eletrodo ligado ao terminal positivo da fonte). Esta é a polaridade que confere maior estabilidade e comumente empregada em soldagem de união. O processo MIG/MAG na condição CC- está associado à instabilidade do arco e geração de respingos [9], mas certas misturas de gases permitem melhorar estas divergências, como é descrito por [18]. Entretanto, a condição CC- tem características que podem ser desejáveis para determinadas aplicações:

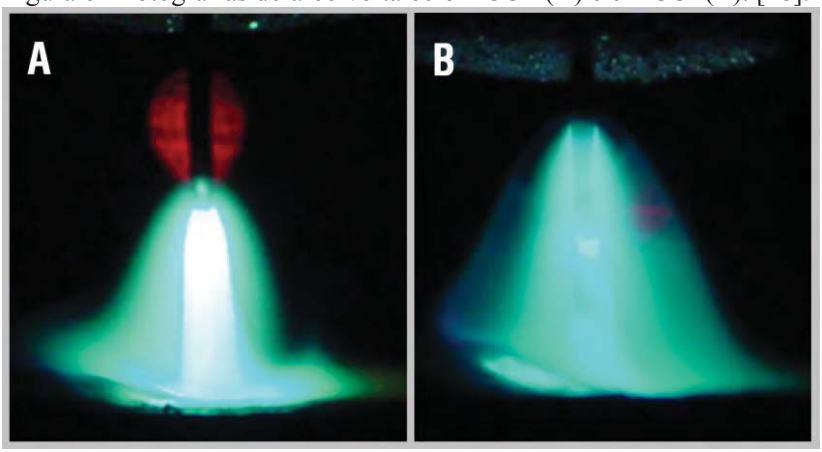
- O calor aportado à peça a ser soldada é menor nesta condição. Isto pode ser útil na soldagem de chapas finas ou em soldagens de revestimento [5,18],
- Para uma mesma corrente de soldagem, a taxa de fusão é maior no processo em CC- do que em CC+[5,18,19].

A maior taxa de fusão do processo MIG/MAG CC- pode ser explicada a partir da diferença de comportamento do arco na polaridade positiva como na negativa. No MIG/MAG convencional (CC+) o arco

ancora na extremidade do eletrodo, como mostrado na Figura 6. No MIG/MAG CC- há uma escalada do arco até uma parte mais alta da extensão livre do eletrodo. Ao envolver o eletrodo numa maior extensão, o arco transfere o calor para o arame com maior eficiência. [5].

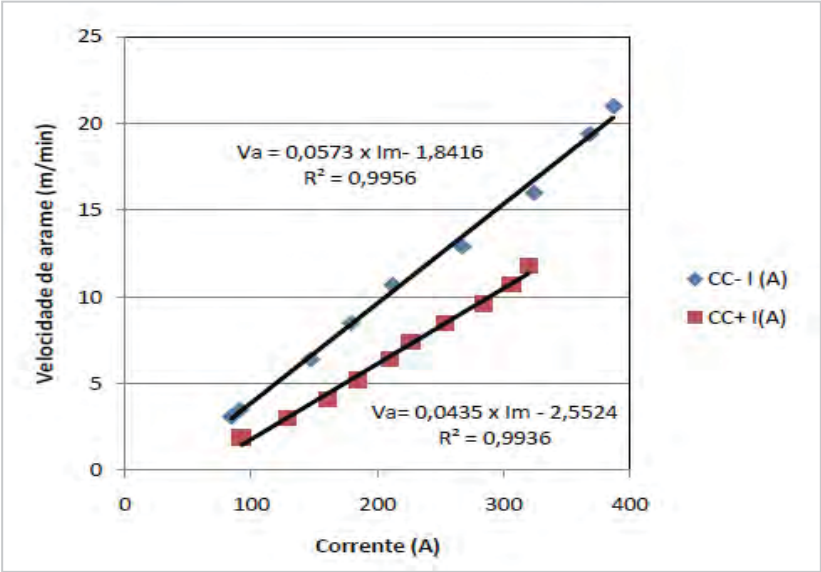
Este fenômeno pode ser explicado pela densidade media na mancha catódica (-) e anódica (+) (pontos de apoio do arco) é entre 100-300 A/mm2 e 15 a 30 A/mm2, respectivamente [20]. Esta diferencia sustentada pela natureza do fenômeno de emissão de elétrons; a procura de regiões com melhor emissividade, neste caso, regiões do eletrodo onde existem camadas de óxido.

Figura 6 - Fotografias do arco voltaico em CC+ (A) e em CC- (B). [18].



Estas características tornam o MIG/MAG CC- adequado para aplicações automatizadas nas quais se pode ter um maior controle dos parâmetros de soldagem. Bidese [5] mostrou uma aplicação prática do MIG/MAG CC- em soldagem de junta sobreposta para peças automotivas. Ele atingiu similar produtividade (velocidade de soldagem 2,40 m/min) comparada ao Tandem-MIG, processo normalmente utilizado neste tipo de junta, descrito no Capítulo 2.2.6. A seguir a Figura 7 compara a taxa de fusão do MIG/MAG CC- e CC+.

Figura 7 - Taxa de fusão CC- e CC+, para distância bico de contacto peça de 25 mm e arame de 1,2mm ER70S-6. [5]



No entanto, apesar da possibilidade de se controlar as condições do processo MIG/MAG na condição CC-, as velocidades de alimentação de arame elevadas (>20 m/min.) evidenciam baixo desempenho para manter a velocidade de alimentação de arame constante durante a soldagem [5]. Finalmente foi descrito pelo mesmo autor outro limitante relativo à corrente e seu efeito sobre a estabilidade do processo. O seguinte excerto explica melhor este assunto:

> É evidente que para empregar a polaridade negativa de eletrodo existem algumas premissas, o gás de proteção deve ser adequado ao processo e a faixa de parâmetros é restrita a valores acima de 250 A [...]. Desta forma os respingos são reduzidos significativamente não desqualificando o cordão. [5]

2.2.2 MIG/MAG com Corrente Alternada ou CA

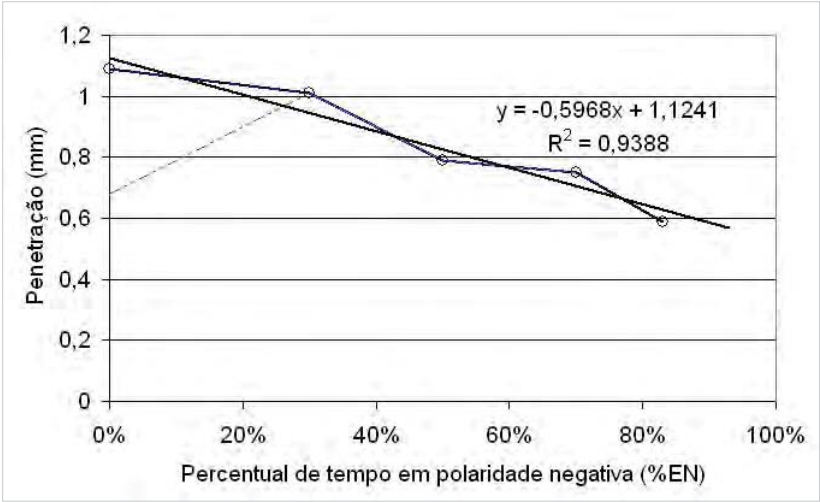
Uma forma de unir a estabilidade do MIG/MAG convencional CC+ com as vantagens que oferece a polaridade negativa (CC-) (ganho na taxa de fusão e diminuição do calor aportado à peça) é mediante o

uso da corrente alternada ou MIG/MAG CA. As fonte mais simples, apenas um transformador, descreve uma função sinusoidal na mesma frequência da rede 50-60Hz. Esta suave transição da polaridade produz em muitos casos a extinção do arco quando o valor da tensão se aproxima do zero. Este evento é aplacado atualmente com alta dinâmica na transição da corrente, na utilização de ondas retangulares, e no uso de ignitores de alta tensão e frequência [8].

Basicamente, para o aço, neste processo existem 2 fases em cada ciclo: Um pulso positivo para destacamento da gota e uma base negativa responsável do incremento na taxa de fusão e pelo menor calor aportado a peça, característicos da polaridade negativa [9,19,21,22]. Para soldagem de outros materiais como o Alumínio se incorpora outra fase; uma base no positivo para limpeza catódica [22].

Embora este processo propicie um ganho em taxa de fusão quando comparado ao MIG/MAG convencional, Santos [22] considera como sua característica mais relevante, a possibilidade de se diminuir a penetração da solda, esta redução proporcional ao percentual do tempo em polaridade negativa. (ver Figura 8). Esta vantagem na redução na penetração em relação á mesma velocidade de alimentação de arame para o MIG/MAG convencional valida este processo para soldagem de dutos em operação ou em soldagem de chapa fina.

Figura 8 – Relação entre % EM e Penetração para chapa 4,7 mm.[22]



Outro processo desenvolvido atualmente no LABSOLDA é o MIG/MAG PS (pulsado sincronizado), um novo processo que sincroniza a polaridade com a posição, neste caso de soldagem com tecimento perpendicular ao avanço. Assim este processo, por exemplo, para soldagem de revestimento aplica a polaridade positiva nos extremos do tecimento a fim de garantir uniformidade entre cada tecimento paralelo, e a polaridade negativa no restante do tecimento para redução na penetração [5].

Outra variante desta técnica é o MIG/MAG PS switch-back. A diferença da anterior na qual o tecimento é perpendicular à trajetória nesta, o tecimento é no mesmo sentido da trajetória numa dinâmica de ida e volta [5]. Respectivamente o avanço e o retrocesso correspondem às polaridades negativa e positiva. Este processo permite o controle da sustentação da poça, evitando o *burn-thought*, e foi aplicado com sucesso na aplicação mostrada no item 4.3. Este tema também é complementado no item 2.4.2, referente ao *burn-thought.*

Finalmente é evidente que a taxa de fusão do MIG/MAG CA seja entre aquelas obtidas com MIG/MAG convencional (CC+) e CC-.

2.2.3 Manipulação do *Stick Out*

Como foi comentado na introdução do processo MIG/MAG, basicamente a fusão do arame é consequência de dois fatores fundamentais:

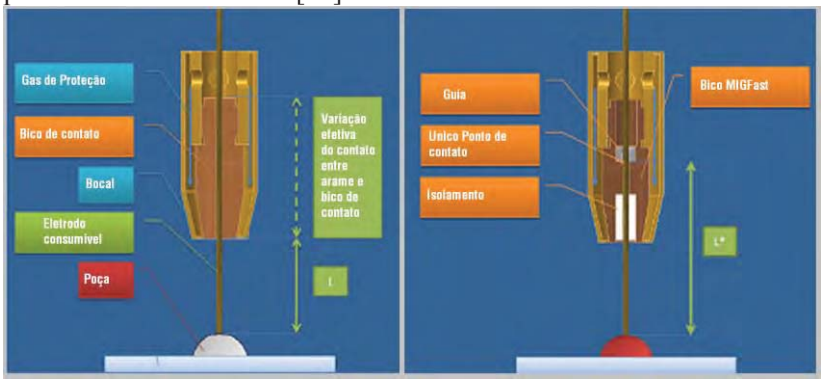
- O calor transferido pelo arco na extremidade do eletrodo (no caso do MIG/MAG CC+). Este calor é proporcional à corrente e representado no primeiro termo da Equação 2-1, cap. 2.1,
- O calor gerado por efeito Joule devido à corrente que circula entre o bico de contato e o inicio da formação do arco, através da denominada extensão livre do arame (L) como mostrado na Figura 9-A. Este calor gerado por efeito Joule é representado pelo segundo termo na Equação 2-1,

Outro fator a ser considerado é o fato do diâmetro do orifício do bico de contato ser maior do que o diâmetro do eletrodo, como consequência a extensão efetiva do eletrodo fica dependente do ponto de contato entre eles, podendo inclusive ter uma variação de quase o dobro do comprimento do arame sujeito ao aquecimento por efeito Joule. Esta

variação no comprimento efetivo do eletrodo pode decorrer em instabilidade do processo [23].

Um dos fabricantes de bicos de contato propõe uma alternativa para o aumento da taxa de fusão que envolve de forma mais efetiva o segundo termo da Equação 2-1, o aquecimento por efeito Joule [23]. Este desenho de bico de contato baseia sua nova tecnologia tanto no incremento do *stickout* ou comprimento de eletrodo sólido sobre um inserto cerâmico, como no fato de ter uma área reduzida de contato, satisfazendo o problema de contato aleatório abordado acima. Deste modo a empresa oferece benefícios como o 40% de incremento em velocidade de soldagem, a redução de respingos, a diminuição de corrente e de gás de proteção, dentre outros.A Figura 9 mostra comparativamente o detalhe de uma tocha MIG/MAG com um bico convencional e de um bico da marca MIGfast com inserto cerâmico e único ponto de contato elétrico.

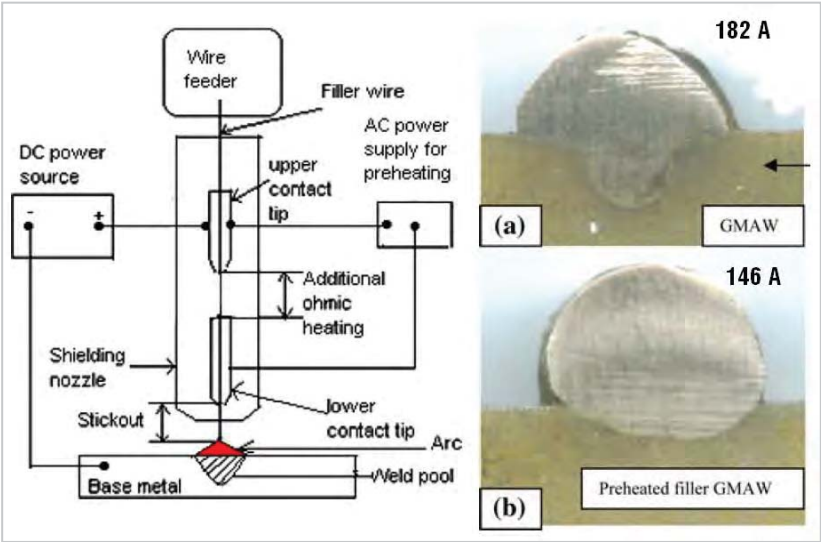
Figura 9 - Esq. Detalhe duma tocha MIG/MAG com um bico convencional. Dir. Bico da marca MIGfast com inserto cerâmico e único ponto de contato elétrico. [23]



Outra experiência relativa ao incremento do aquecimento por efeito Joule é relatada por Amandeep [24] para soldagem de revestimento. Essa técnica é chamada de “alimentador pré-aquecido” ou UGMAW e emprega uma tocha especialmente desenhada para o preaquecimento do arame e com fonte independente. A Figura 10 mostra a configuração deste dispositivo na esquerda, e na direita o resultado comparado ao MIG/MAG convencional. O resultado mostrou queda significativa nos valores da corrente no arco, diminuindo a penetração e a diluição em 44% e 67%, respectivamente. Esta técnica

também é justificada pelo baixo custo investido na modificação da tocha. Os valores apresentados na Figura 11 mostram uma redução de 36 A ou 20% no valor da corrente, comparado ao MIG/MAG convencional. Dois depósitos de arame 316L sobre chapa são comparados numa Vs=0,2 m/min, Va=6 m/min. Na mesma Figura a corrente empregada no arco (a) 182 A, (b) 146 A no arco mais 110 A de corrente de pré-aquecimento.

Figura 10 - Esq. Esquema do processo MIG/MAG com o dispositivo de pré-aquecimento. Dir. Se observa significativa redução na penetração e incremento no reforço na utilização de corrente de pré-aquecimento (b) comparado ao MIG/MAG convencional (a). [24]

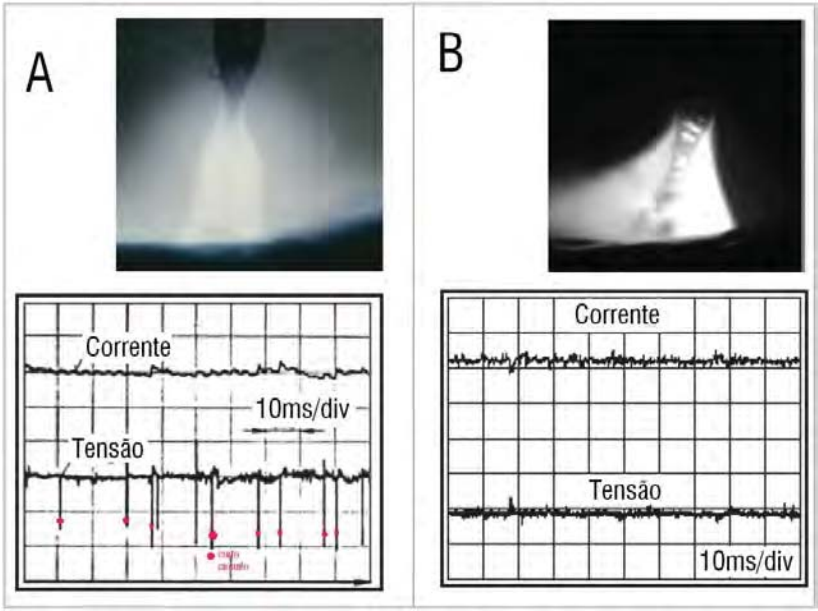


2.2.4 Curto Circuito Forçado

No modo de transferência goticular (*spray*), Figura 11a, numa condição de menor comprimento de arco, existe a possibilidade de "colar de gotas" consecutivas que podem tomar contato com a poça, produzindo eventuais curtos circuitos e consequentemente respingos ou espalhamento. Estes curtos circuitos observados no valor da tensão no mesmo diagrama. Assim alguns fabricantes especializados em fontes de soldagem oferecem variantes do curto circuito forçado (CCF) como: ForceARC (EWM), Rapid ARC (Lincoln), Rapid MIG Tecnology (ESS), STC (Motoman), que mediante o controle dos distintos

parâmetros tanto da potencia fornecida como da alimentação de arame reduzem a formação de respingos.

Figura 11. A) Fotografia do MIG/MAG convencional no modo goticular e reduzido comprimento de arco. B) ForceArc. Cada fotografia acompanhada do oscilograma U-I. Modificado de [25].



Como mostrado no oscilograma da Figura 11a, tanto a extinção do arco como a abertura do arco podem ser lidas no valor da tensão, devido à direta relação entre comprimento de arco e tensão. Assim uma rápida dinâmica na regulação da corrente, baseada na leitura dos valores instantâneos da tensão e corrente, permite manter tanto a estabilidade do processo como a possibilidade de modificar a extensão do arame para soldagem em juntas com limitado acesso. [25].

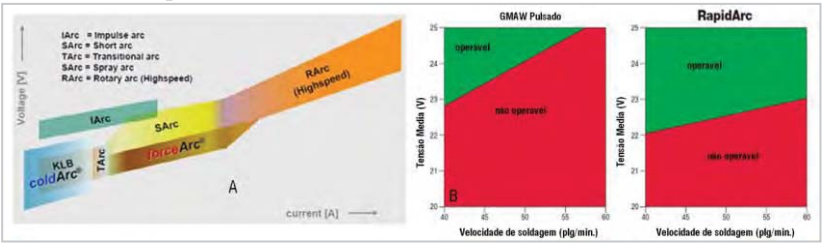
Algumas vantagens que um curto comprimento de arco oferece são descritos a seguir:

- Melhor penetração devido à alta pressão do gás de plasma.
- Facilidade da solda manual devido à rigidez e direcionamento do arco e menor aquecimento da mão do soldador;

- Maior eficiência de produção devido à alta velocidade de solda.
- Melhor acabamento e distorção devido ao menor calor aportado à peça.

Do mesmo modo, a Figura 12, obtida de fabricantes afins, mostra a diminuição da tensão como característica principal frente ao MIG/MAG convencional, portanto uma diminuição da potencia do arco e do calor aportado a peça.

Figura 12. A) Mapa U-I e os modos de transferência adotados pela EWM. [25]. B) Região de estabilidade num mapa (U-I) RapidArc (Lincoln). Adaptado de [26]

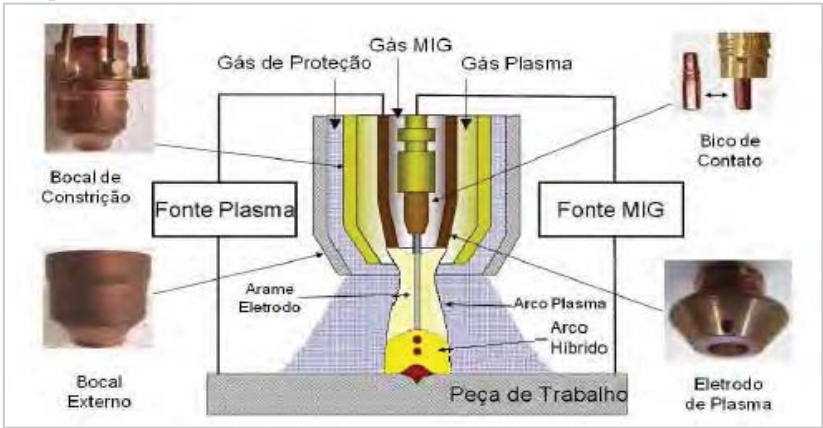


2.2.5 Plasma-MIG.

O Plasma-MIG, como esquematizado na Figura 13, é um processo que adiciona uma atmosfera de plasma à extensão livre do eletrodo, esta atmosfera ainda incide sobre a peça. Comparável ao MIG/MAG CC-, em que a escalada do arco pelo arame oferece uma transferência de calor adicional, o arco de plasma age de jeito similar aquecendo o arame ao contorná-lo, o que permite um balanço entre a corrente MIG/MAG e a corrente do plasma necessária para fundir o eletrodo. Dito de outro jeito, o arco do plasma permite a redução da corrente necessária no MIG/MAG para fundir a mesma quantidade de arame [27,28].

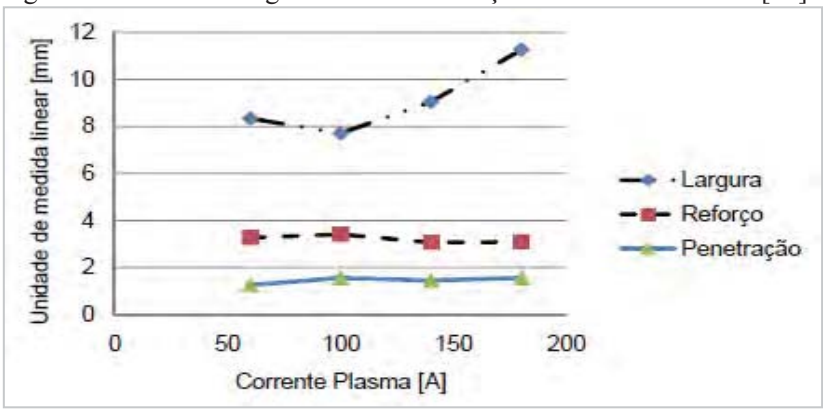
Este sistema de soldagem para o processo Plasma-MIG deve ter a capacidade de gerar tanto o arco voltaico entre o eletrodo permanente e a peça a ser soldada, denominado de “Arco Plasma”, como o arco voltaico entre o eletrodo consumível e a peça a ser soldada, denominado normalmente de “Arco MIG” (Oliveira [27]).

Figura 13 - Diagrama da tocha Plasma-MIG com seus principais componentes. [28].



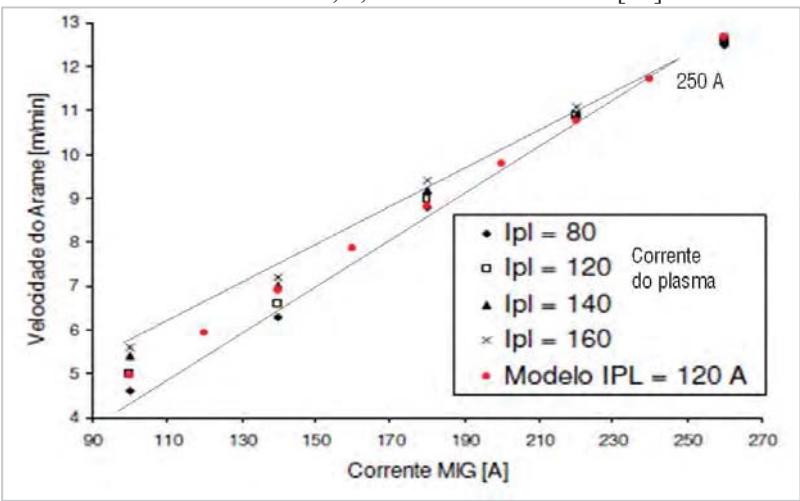
Essa redução na corrente do MIG/MAG permite modificar a geometria do cordão de solda, e portanto flexibiliza a aplicabilidade do MIG/MAG. Oliveira [27] e Resende [28] confirmaram que o incremento da corrente de Plasma permitiu incrementar a largura do cordão de solda, sem modificar o reforço nem a penetração, como mostrado na Figura 14. Por outro lado, Oliveira constatou em ensaios nos quais foi mantido o valor de corrente total, com o balanço entre a corrente de plasma e a do MIG/MAG, que há um incremento na largura do cordão no incremento no plasma. O reforço e a largura não tiveram variação sensível.

Figura 14 - Parâmetros geométricos em função da corrente Plasma. [28].



Apesar da flexibilidade mostrada pelo Plasma-MIG, sua efetividade, para o caso de bitola de 1,2mm de arame ER70S6, é acentuada abaixo da faixa da corrente de transição (250 A). Oliveira [27] descreve de modo comparativo com alumínio, que devido à menor condutividade térmica do Aço Carbono, a contribuição da corrente plasma para a taxa de fusão diminui no incremento da velocidade do arame, como mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Influência da corrente no eletrodo e no plasma sobre a velocidade do arame ER70S6, 1,2 mm. Modificado de [27].



2.2.6 Tandem eTwin MIG (Potencial único e Potencial Isolado)

O processo de soldagem MIG/MAG duplo-arame pode ser referido como uma variante do processo MIG/MAG convencional, na qual se visa o aumento da capacidade de produção do processo. A grande diferença em relação ao MIG/MAG convencional é a utilização de dupla alimentação de arame, podendo formar uma ou duas poças de fusão. A energização dos dois arames-eletrodo pode ser feita através de um único bico com dois condutos para cada arame ou por meio de de dois bicos eletricamente isolados, definindo assim o processo MIG/MAG duplo arame com potencial único (DAPU) e o processo MIG/MAG duplo arame com potencial isolado (DAPI),

respectivamente. As seguintes Figuras 16 e 17 mostram as distintas configurações descritas por Groetelaars [29].

Figura 16 - Representação esquemática do processo MIG/MAG com duplo arame, A. Potencial Único, B. Potencial Isolado. [29].

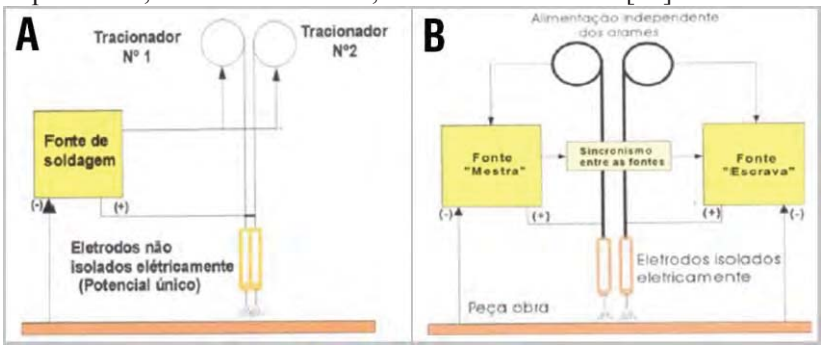
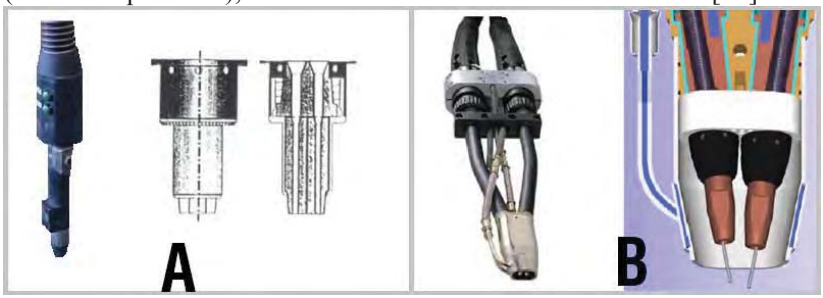


Figura 17 - A.Tocha de potencial único (modelo fabricado pela Abicor-Binzel), com seu respectivo detalhe. B. Tocha de potencial isolado (fabricado pela TBI), com detalhe do bocal e bico de contacto. [29].

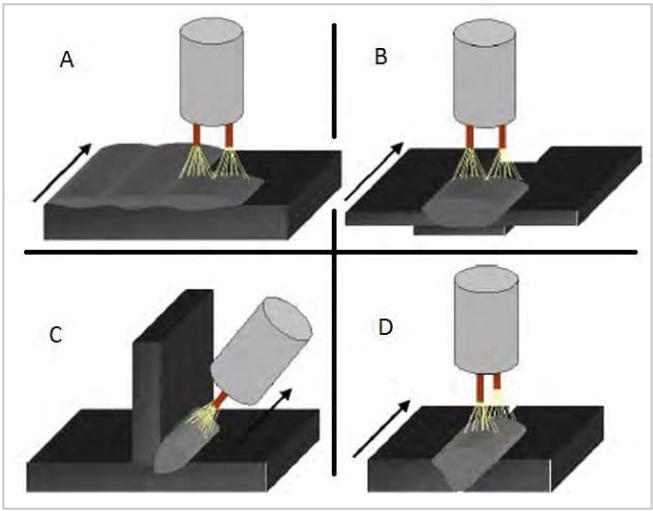


Ramirez [2] mostra que o processo MIG/MAG-DAPU apresenta uma taxa de fusão específica (kg/h.A) inferior ao processo convencional. Este incremento de corrente por quantidade de arame fundido, ou redução na taxa de fusão, aporta maior calor à peça e incrementa a penetração. Por outro lado em experiências efetuadas pelo autor foram observados problemas para abertura do arco devido à maior capacidade dos dois arames em paralelo para condução de corrente. Também foi observada certa dificuldade para atingir transferência estável na transferência goticular devido ao favorecimento de colar das gotas na convergência da transferência entre os dois eletrodos, este tema também tratado no cap. 2.4.4.

O processo MIG/MAG-DAPI oferece uma taxa de fusão específica similar ao processo base, mas com elevada taxa de deposição de material, que por consequência, permite atingir maior produtividade. Alguns autores citam exemplos de aplicações, nos quais expressam dobrar a produtividade em relação ao processo com um arame. Eles destacam, ainda, que problemas como mordedura ou falta de fusão e porosidade, que foram verificados na soldagem com um arame a altas velocidades, são reduzidos com o emprego do duplo arame (Motta [3]).

Finalmente, como mostrado na Figura 18, de acordo com o avanço da tocha, a disposição dos arames pode ser em série o paralelo, conhecidos também como Tandem-MIG ou Twin-MIG respectivamente. A primeira possibilita uma maior penetração e acarreta em aumento da diluição, devido à concentração da energia [29]. Essas características possibilitam sua aplicação preferencialmente em soldas de filete e de topo. A disposição em paralelo é utilizada sobre tudo para soldagem de revestimentos, porém também pode ser aplicada para juntas de topo. Neste último caso, a concentração de calor é maior nas bordas da junta do que no centro do cordão, o que é considerado por Ramirez [2] como vantagem, pois permite uma soldagem de juntas mal ajustadas ou com grande abertura de raiz.

Figura 18 - Exemplo da utilização do processo com duplo arame com disposição em serie e paralelo. a) Em revestimentos, b) em soldagem de uma junta de topo com cobre-junta, c) Soldas de filete, d) soldas de topo. [29].



2.3 PROCESSO MIG/MAG COM ADIÇÃO DE ARAME

Ainda é escassa a informação sobre adição de arame ao processo MIG/MAG.Majoritariamente o Grupo de Estudos em tecnologia da Soldagem (GETSolda) da Universidade Federal do Pará (UFPA) desde o ano 2005 tem apresentado alguns trabalhos, entre dissertações, TCCs, e distintos artigos sobre inserção de arame frio no processo MIG/MAG convencional.

Por outro lado, uma empresa de alimentadores de arame adicional frio para processos TIG, Plasma ou MIG/MAG aconselha o uso para os seguintes propósitos: requerimentos metalúrgicos, para adição simples de material numa junta "V" ou "T", para revestimento na qual é necessária baixa diluição, para controlar a fluidez da poça mediante o resfriamento da poça [30].

Também no LabSolda-UFSC foi realizado um relatório sobre soldagem com dois arcos e um arame adicional. Em todas aquelas experiências anteriores foi inserido arame frio. No entanto ultimamente o CCWJ (Canadian Centre for Welding + Joining) têm desenvolvido experiências de adição de arame quente ao processo MIG/MAG orientado a técnicas de revestimento [31]. Estes trabalhos são mostrados cronologicamente na Tabela 2, na qual se mostra o ganho atingido no valor absoluto ou seu valor relativo ao arame principal. Também é especificado o tipo de arame e gás utilizado.

Tabela 2 - Estudos preliminares sobre adição de arame no MIG/MAG.

ANO	AUTOR	TITULO	CONFIGURAÇÃO	Velocidade de arame m/min	Tipo de arame	Gas
2006	Da Costa Louise [32]	AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ECONÔMICAS DO PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW COM ALIMENTAÇÃO ADICIONAL	Eletrodo Principal	6, 8 e 10	ER70S-6 1.2mm	Ar+25%CO_2
			Arame Adicional	2; 2,7; 4,1 respect.	ER70S-6 1.2mm	
2007	Da Costa Louise [33]	ESTUDO METALURGICA E DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE SOLDAS GMAW-CW.	Eletrodo Principal	6, 8 e 10;	ER70S-6 1.2mm	Ar+25%CO_2
			Arame Adicional	3,2;4,2;6 respect.	ER70S-6 1.2mm	
2007	Dias Alberto [34]	ESTUDO DA VIABILIDADE OPERACIONAL DO PROCESSO DE SOLDAGEM MAG COM ALIMENTAÇÃO ADICIONAL DE ARAME FRIO	Eletrodo Principal	6;7,5;9	ER70S-6 1.2mm	CO_2
			Arame Adicional	3;4;5 Respect.	ER70S-6 1.2mm	
2007	Neto Abílio [35]	DESENVOLVIMENTO DE PROCEDIMENTOS DE ALTA EFICÁCIA PARA SOLDAGEM DE HASTES ANODICAS (TARUGOS REDONDOS DE GRANDE DIÂMETRO)	EletrodosPrincipais	12,4 + 11,1	2X er70s6 1.2	Ar+8%CO_2
			Arame Adicional	6,3 m/min	ER70S-6 1.2mm	
2009	Mendes Cassio [36]	SISTEMA DE CONTROLE DE MOTOR CC EM MALHA-FECHADA PARA ALIMENTAÇÃO DE ARAME EM MÁQUINAS DE SOLDAGEM	Eletrodo Principal	6	ER70S-6 1.2mm	CO_2
			Arame Adicional	2,5	ER70S-6 1.2mm	

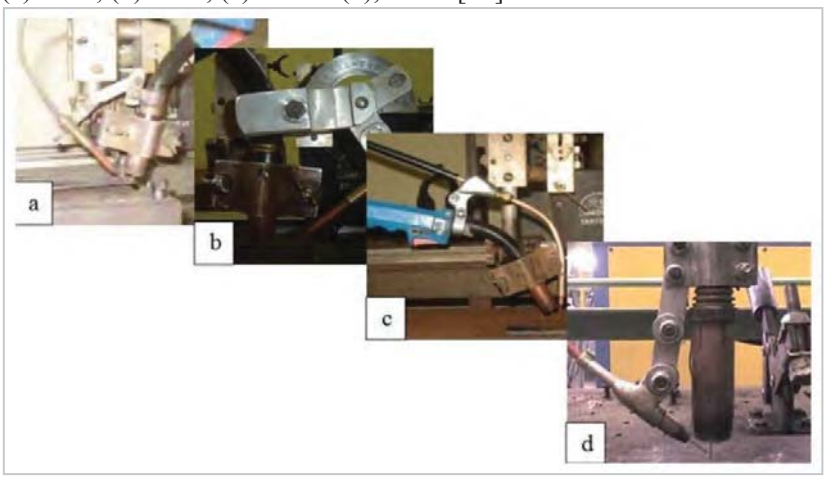
2009	Garcia Douglas [37]	ESTUDOS DAS DESCONTINUIDADES DAS SOLDAS DEPOSITADAS PELOS PROCESSOS DE SOLDAGEM MAG E MAG-CW	Eletrodo Principal Arame Adicional	6 2.4	ER70S-6 1.2mm E71T-1 1,2	CO_2
2009	Ohashi Fernanda [38]	MECÂNICAANÁLISES MACROGRÁFICAS DE JUNTAS SOLDADAS DEPOSITADAS PELOS PROCESSOS MAG E MAG COM ARAME FRIO	Eletrodo Principal Arame Adicional	6 2,5	ER70S-6 1.2mm ER70S-6 1.2mm	CO_2
2010	DA SILVA FABIO [39]	ESTUDO DA VIABILIDADE DO PROCESSO DE SOLDAGEM FCAW COM ADIÇÃO DE ARAME FRIO, APLICADO A INDÚSTRIA NAVAL	Eletrodo Principal Arame Adicional	6;8;10 2;3;4 respect.	E71T-1 1,2 er70s6 0.8 1.0	CO_2
2010	Lobato Ariana [40]	ESTUDO DA ESTABILIDADE DE ARCO DAS SOLDAS EXECUTADAS COM O PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW-CW	Eletrodo Principal Arame Adicional	6;7.5;9 3;4;5 Respect.	ER70S-6 1.2mm ER70S-6 1.2mm	CO_2
2010	De CatroDiogo [41]	CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA DO CORDÃO DE SOLDA NO PROCESSO MIG COM ADIÇÃO DO ARAME NÃO ENERGIZADO EM DIFERENTES ÂNGULOS DE ATAQUE.	Eletrodo Principal Arame Adicional	8 8	ER 308LSI ER 308LSI	Ar+2%O_2
2011	Da silva Lúcio [42]	ESTUDO DA TÉCNICA DE ENCHIMENTO DE CHANFRO DO AÇO NAVAL PELO PROCESSO GMAW-CW	Eletrodo Principal Arame Adicional	4;6;8 50 60 70 % Respect.	ER70S-6 1.2mm ER70S-6 1.0mm	Ar+25%CO_2; CO_2
2011	Douglas García [43]	SOLDAGEM AUTOMATIZADA MIG-CW APLICADA NO REVESTIMENTO DE CHAPAS DE AÇO CARBONO 1020 COM UMA SUPERLIGA DE NÍQUEL HASTELLOY C-276	Eletrodo Principal Arame Adicional	9;10;11 m/min + 25% para cada caso	ERNiCrMo-4 1.2mm ERNiCrMo-4; 1.2mm	Ar
2011	De Oliveira Andrew [44]	ESTUDO OPERACIONAL E ECONÔMICO DE SOLDAS FCAW COM E SEM ADIÇÃO DE ARAME NÃO ENERGIZADO.	Eletrodo Principal Arame Adicional	6;8;10 2;3;4 respect.	E71T-1 1,2mm ER70S-6 0,8; 1,0 mm	CO_2
2011	Dos Santos Tárcio Cabral [45]	DESENVOLVIMENTO E ESTUDO DA VIABILIDADE DE UM INJETOR DE ARAME ADICIONAL PARA O PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG E FCAW.	Eletrodo Principal Arame Adicional	6;8;10 2;3;4 respect.	E71T-1 1,2mm ER70S-6 0,8; 1,0 mm	CO_2
2013	CCWH, Univ. Alberta [46]	Transferência goticular com adição de arame quente (HWGMAW) sobre aço (100 AR). (Corrente pulsada para aquecimento do arame).	Eletrodo Principal Arame Adicional	8.5 m/min 6 m/min	ER70S-6 1,2 mm ER70S-6 1,2 mm	Ar

Todos estes trabalhos coincidem no fato de ter incrementado a taxa de deposição e, portanto a produtividade. A média deste incremento foi de 48 %, os valores máximos e mínimos foram de 25% e 100%, respectivamente. As configurações de inserção de arame foram diversas, as mais comuns pela frente e por trás do arco, ou como alguns autores mencionam “empurrando” ou “puxando” o arame adicional. Ainda existe uma experiência que insere o arame lateralmente (“Twin”), Louise [33].

A partir das experiências iniciais foi necessário o desenvolvimento de distintos injetores que permitissem a condução do arame não energizado à região da poça. Estas modificações foram

adaptadas à tocha MIG/MAG visando diminuição no peso, dissipação de calor, maior flexibilidade de ângulo de entrada do arame ou graus de liberdade, distancia horizontal em relação ao arco e simplicidade na instalação em tochas de soldagem automáticas ou semi-automáticas. O autor, na Figura 19 mostra os distintos gabaritos elaborados a partir do ano 2005. Cabral [45].

Figura 19 - Evolução dos injetores de arame não energizado na UFPA (a) 2005; (b) 2007, (c) 2008 e (d), 2009. [45].



Cabe destacar as informações que Méndez et al. [31] expressam em quanto às vantagens que o processo com adição de arame quente oferece como técnica de revestimento. Entre estas estão:

- Faixa de deposição de 2 a 6,7 kg/h,
- Simplicidade no equipamento comparado ao PTAW ou sistemas de revestimento Laser,
- Devido à diminuição da corrente empregada por quantidade de material depositado é possível diminuir tanto a penetração como a diluição. Assim são obtidos revestimentos com características mais próximas do material de adição ainda com menor aporte térmico à peça. [31]

2.4 OUTRAS CONSIDERAÇÕES RELATIVAS AO PROCESSO MIG/MAG E ADIÇÃO DE ARAME

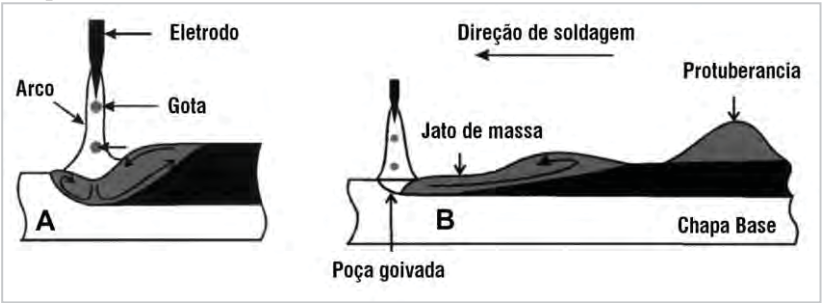
Dentro da Fundamentação Teórica, outros efeitos e conceitos relativos à alta produtividade são considerados, os mesmos serão tratados a seguir.

2.4.1 Humping

Um defeito comumente observado que caracteristicamente ocorre em alta velocidade de soldagem é a formação de ondulações periódicas, também conhecidas como *Humping*. A ocorrência do *Humping* limita a faixa em que a velocidade de soldagem possa ter aplicação na maioria de processos de soldagem por fusão, limitando o incremento da produtividade [47,48]. Na atualidade, os mecanismos físicos responsáveis pela ocorrência do *Humping* ainda não são bem entendidos [49].

Baseado em imagens de vídeo, Nguyen et al. [49] identificou o momento de retrocesso da poça como o maior contribuinte deste fenômeno tipicamente ocorrido no incremento da velocidade, como mostrados na Figura 20. Intentos, como soldagem na posição descendente e uso de gases ativos, foram favoráveis à redução do momento de retrocesso da poça. Isto sugere que qualquer alternativa para mitigar este momento de retrocesso da poça incrementaria a velocidade de soldagem quando limitada pelo fenômeno do *Humping*.

Figura 20 – A. O proceso MIG/MAG e as linhas de fluxo normais. Na Figura B, um exemplo da formação do *Humping*, mostra a parede que forma o retrocesso da poça e a lombada que fica por trás do arco. Adaptado de [48].

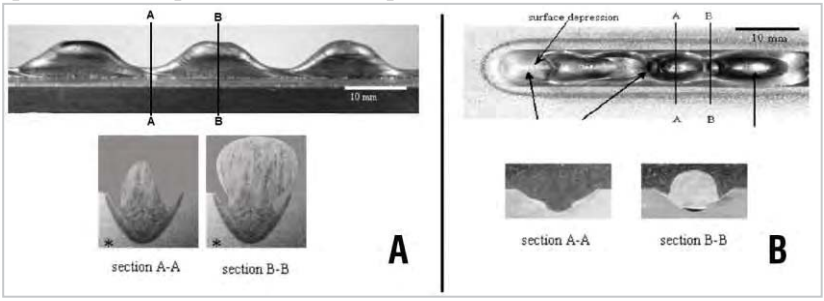


Outras das questões inerentes à formação deste fenômeno é a alta tensão superficial relacionada da utilização de gás de proteção inerte como argônio, este permite acumulação de grande quantidade de material fundido. De outro modo, na utilização de gás de proteção ativo, o metal fundido teria melhor molhabilidade sobre a superfície e, portanto, reduz a possibilidade da formação do *Humping*. Assim, o autor estabelece que na utilização de gás de proteção ativo, e para uma energia empregada no arco de aproximadamente 7.5 kW, o aparecimento deste fenômeno acontece a partir dos 2.5 m/min. [49].

O mesmo autor observou que na soldagem GMAW com distintos gases ativos de proteção é obtida maior largura da poça comparado com cordões nos quais foi utilizado argônio como gás de proteção. De modo geral a maior largura na interface solido/liquido ou, em outras palavras, uma redução no reforço para o MIG/MAG, incrementa as forças de arrasto viscoso ou a adesão à peça. Este incremento na força viscosa de arrasto é oposto ao momento de retrocesso da poça. De modo geral, a utilização de gases ativos ao invés de gases inertes suprime efeito do *Humping* até que velocidades superiores de soldagem sejam empregadas [49]. Por outro lado, Soderstrom et al.[50], classificaram em duas distintas categorias a formação deste fenômeno, GRM (gouging region morphology) e BCM (beaded cylinder morphology), de acordo com sua aparência visual.

Usualmente os defeitos GRM, como mostrado na Figura 21 (B), acontecem na utilização do TIG quando da utilização de elevada corrente e alta velocidade de soldagem. Esta morfologia caracterizada pela sucessão de crateras entre a formação de cúmulos de solda. Também, o frente da poça mostra uma grande depressão. Em alguns casos, dois pequenos canais aparecem nas paredes do espaço sem enchimento. A Figura 21 (A) mostra os defeitos do tipo BCM, na qual é evidente a cratera. A característica morfológica do BCM é a formação de protuberâncias sobre a superfície da peça, conectadas por um fino canal central. O cordão de solda, neste caso, apresenta o aspecto de continua ondulação. Em alguns casos, ainda, estas protuberâncias mostram-se desconectadas, porém indícios do canal central podem ser observados. Existe ainda o caso em que se combinam os dois modos BCM e GRM [50].

Figura 21 - A. Tipo de *Humping* BCM normalmente apresentada no processo MIG/MAG. B. o tipo de *humping* GRM, normalmente apresentada no processo TIG. Adaptado de [50].



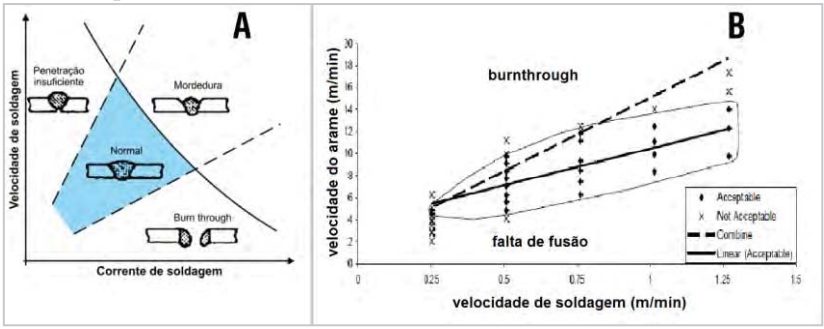
2.4.2 Perfuração / Falta de Penetração

Alem da descontinuidade do "humping", outras limitações são apresentadas especialmente na soldagem de chapa fina na tentativa de incrementar a produtividade:

- Penetração insuficiente, devido ao incremento na velocidade de soldagem sem balançar o adequado incremento da corrente;
- Mordedura, caracterizada pela formação de sulcos paralelos ao cordão de solda devido ao incremento excessivo de velocidade de soldagem e corrente;
- Perfuração ou "burn-through" por excesso de penetração no emprego de altas correntes com baixas velocidades de soldagem.

A Figura 22 mostra a relação entre os defeitos de soldagem e a velocidade de soldagem e a corrente empregada.

Figura 22 - A. Influencia da Vs e I sobre a aparência do cordão de solda. Adaptado de [51]. B. Mapa determinado entre a perfuração e a falta de fusão para soldagem de junta sobreposta (2.4 mm), relacionado pela Vs e Va. Adaptado de [52].



Drummond [52] explica que a perfuração especialmente acontece em soldagem continua de lâmina metálica, no qual é atrativo o emprego de alta velocidade de soldagem para o incremento da produção. Quando, na soldagem de produtos de lámina metálica, o limitante na velocidade de soldagen é imposto pela ocorrência do "humping", a habilidade para aplacar o fenomeno do "humping" mediante o incremento da profundidade da poça tem de ser balanceado para evitar exessiva penetração ou *burn-through*.

Uma das formas de atenuar o *burn-through* sem detrimento da produtividade foi mediante a utilização do MIG/MAG AC, [52]. Tambem, o autor comenta sobre o emprego de Tandem MIG/MAG mais com um dos eletrodos como DCEP e outro em modo DCEN. Esta possibilidade permitiu não só sobrelevar o fenómeno da perfuração, mas tambem esta modalidade oferece menor calor aportado à peça e portanto menor distorção. O autor comenta da ampla utilização deste último método na fabricação de artigos de linha branca no Japão, para soldagem de chapa fina.

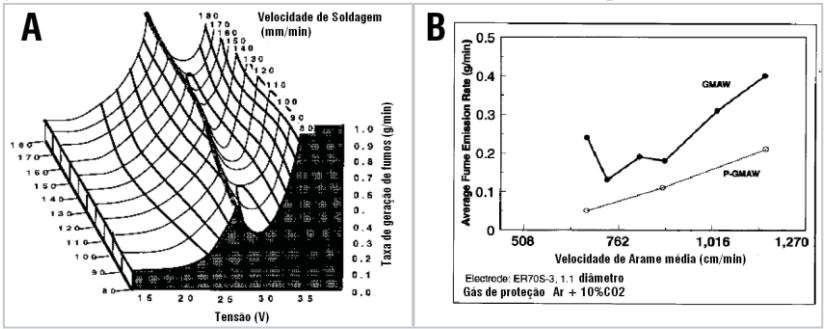
Outras das experiências que Drummond comenta é sobre a possibilidade de soldagem de chapa fina com gap de até 3 vezes a espessura sem a ocorrência do *burn-through*. Também, o autor expõe que, mediante a utilização do processo MIG/MAG com polaridade variavel, a soldagem de peças não estructurais de automoveis pode ser feita apesar do grande gap, sem estas serem perfuradas.

2.4.3 Geração de Fumos

De acordo a Reeding [53] no mundo tem se estimado que a indústria gera um milhão de toneladas de solda no ano. Baseado na produção de 0.5% de fumos do total do metal soldado, uma estimativa de 5000 toneladas de fumos são produzidos por ano. Uma porção deste fumo é absorvida pelo soldador o que poderia afetar sua saúde. Efeitos no soldador incluem irritação na parte interna dos pulmões e febre por fumaça metálica. Outros estudos tem indicado um leve incremento no predomínio de câncer do pulmão e asma como resultado do trabalho em soldagem. Por outro lado, segundo Quimby [16], em alguns países desenvolvidos, as agencias públicas relacionadas à segurança e higiene na indústria exercem maior pressão por normas mais rigorosas nos limites permissíveis de partículas metálicas no ar.Também, a geração de fumos no ambiente de trabalho incrementa as tarefas de limpeza e manutenção do espaço e o equipamento.

Quimby [16] mostrou um comportamento padrão na geração de fumos. Este aumenta conforme incrementada a corrente, tensão e velocidade de arame, e na transição do curto-circuito ao globular. A transferência globular gera um pico na geração de fumos como ilustrado na Figura 23 (A), na aresta paralela ao eixo da velocidade de arame. Na elevação da tensão, a taxa de fumos cai drasticamente conforme a transferência muda de globular para spray. Esta queda na geração de fumos com relação ao pico é de aproximadamente a metade, em outras palavras, o valor do pico é o dobro do que o vale. Na mesma velocidade de alimentação de arame (7,6 m/min.), mas com MIG/MAG no modo pulsado, a queda de geração de fumos entre o modo globular e o spray pulsado é ainda mais drástica. Neste caso, a diferença entre o pico e o vale é de nove vezes. Isto é corroborado por alguns autores, entre eles Wallace [17], ver Figura 23 (B). A partir do ponto de sela, o incremento da tensão incrementa agudamente a taxa de geração de fumaça, tanto para o MIG/MAG convencional como para o MIG/MAG pulsado, conforme a transferência muda de spray para spray rotacional. Cada combinação de eletrodo/gás de proteção tem um único padrão, neste caso o autor utilizou como gás de proteção Ar+ 8% de CO2 e arame do tipo ER70S-3 de 1.2 mm de diâmetro.

Figura 23 - A.Modelo de geração de fumos (gás de proteção Ar+ 8%CO2, ER70S-3 1.2 mm). Adaptado de [16]. B, diferença da taxa de geração de fumos entre o GMAW e o GMAW-P. Adaptado de [17]



A taxa de geração de fumaça é incrementada no acréscimo de: CO_2 e O_2 no gás de proteção, temperatura do arco, condutividade térmica da mistura e volume das gotas transferidas. A quantidade de fumo gerado no processo MIG/MAG é maior para misturas com CO_2 do que com O_2, ainda com o mesmo potencial de oxidação [54].

Finalmente, Wallace [17] mostrou similares reduções na exposição dos soldadores aos gases gerados no ambiente de trabalho.

2.4.4 Forças Magneticas

Este sub-capitulo, de modo breve, explora os efeitos do campo magnêtico gerado por dois eletrodos paralelos sobre a deflexão no arco e o aspecto da poça.

Do eletromagnetismo, uma corrente através de um condutor gera um campo magnético. Isto tambêm aplica para o arco, neste caso o condutor de fluxo de elétrons entre o eletrodo e a a peça-obra. A Figura 24 exemplifica o modelo adotado. De modo simples, a corrente I_1 através do eletrodo e o arco 1 para a peça-obra gera um campo magnético B_1; a uma distância D este campo pode ser calculado conforme a equação 2-3, a seguir:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi D} \qquad \text{Equação 2-3}$$

Na qual, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$Tm/A, é a permeabilidade magnética do ar.

De acordo com os principios do eletromagnetismo na iteração entre dois condutores paralelos, um eletrodo 2, na presença do campo magnético B_1 é sujeito a uma força F_2, proporcional ao comprimento do condutor (neste caso o comprimento do arco) La_2, à corrente através do condutor I_2 e campo magnético B_1. Esta força perpendicular ao fluxo de campo magnético B1 e corrente I_2 é modelada na equação 2-4, a seguir.

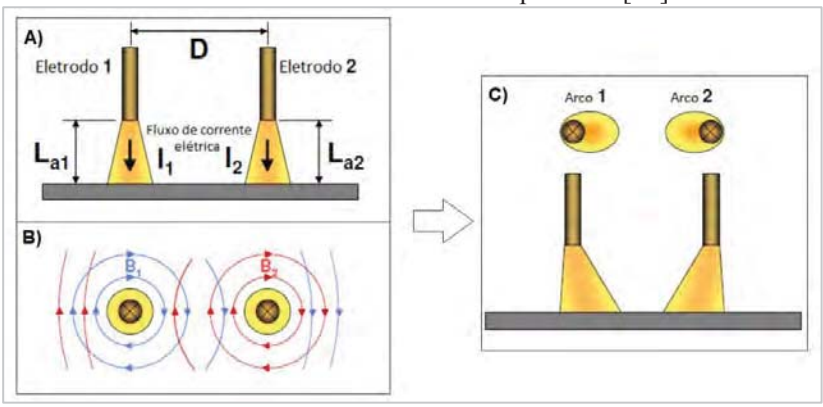
$$F_2 = I_2 \cdot La_2 \cdot B_1 \qquad \text{Equação 2-4}$$

Dado que o campo magnético B1 é originado no eletrodo 1, a força resultante no arco 2 pode ser expressa pela equação 2-5.

$$F_2 = \frac{\mu_0 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot La_2}{2\pi \cdot D} \qquad \text{Equação 2-5}$$

Esta força, conhecida também como força de Lorentz, é exercida sobre os eletrons e ions no arco defletindo estes da sua trajetória normal. De acordo a Kang [55], o arco elétrico pode ser defletido também na presença de um campo electromagnetico induzido. O autor explica que no uso de um campo bidireccional (no caso de utilização de corrente alternada), o arco oscilará, perpendicular ao campo magnético. Esta oscilação pode ser aplicada no rastreamento da junta (oscilação perpendicular à trajetoria), ou apresentar incremento na largura da poça, detrimento e uniformidade na penetração, no caso da oscilação perpendicular à trajetória de soldagem.

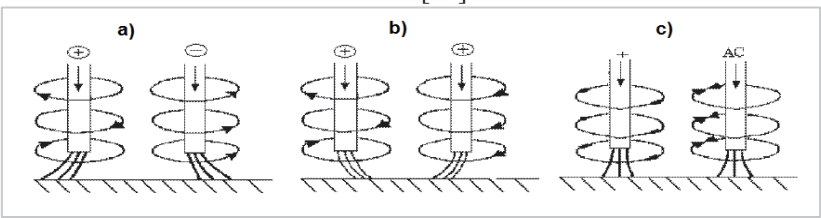
Figura 24 - A) Disposição de dois eletrodos em paralelo, B) o campo magnético gerado e C) a atração dos arcos no caso da utilização de corrente no mesmo sentido nos eletrodos. Adaptado de [56].



No entanto, desde um ponto de vista mais abrangente, campos magnêticos transversais ou longitudinais podem ser gerados, alêm do campo paralelo já tratado. Assim outas causas de deflexão magnética são detalhadas por Machado [57], a seguir:

- Campo magnético devido ao magnetismo residual da peça,
- Distorção do campo magnêtico devido a: assimetria no inicio e fim da peça, presença de regiões aquecidas acima da temperatura de Curie em material ferromagnetico, ou geometría da peça,
- Deformação do campo magnetico transversal gerado pela corrente que flui ao cabo terra. Este fenómeno visivel na borda da peça pode ser aplacado na utilização de CA, não tanto pela alteração ciclica do que pelas correntes parásitas induzidas na peça, as quais geram um campo magnético oposto ao do arco,
- No emprego de dois eletrodos, o autor cita três casos de defleção da poça a) em eletrodos com diferentes polaridades há divergencia entre os arcos, b) no caso de eletrodos com a mesma polaridade os arcos convergem e c) no caso de um dos eletrodos ter CA, é esperada muito pouca defleção, como mostrado na Figura 25, a seguir.

Figura 25 - Iteração entre os campos magnêticos produzidos por eletrodos soldando simultaneamente. [57].



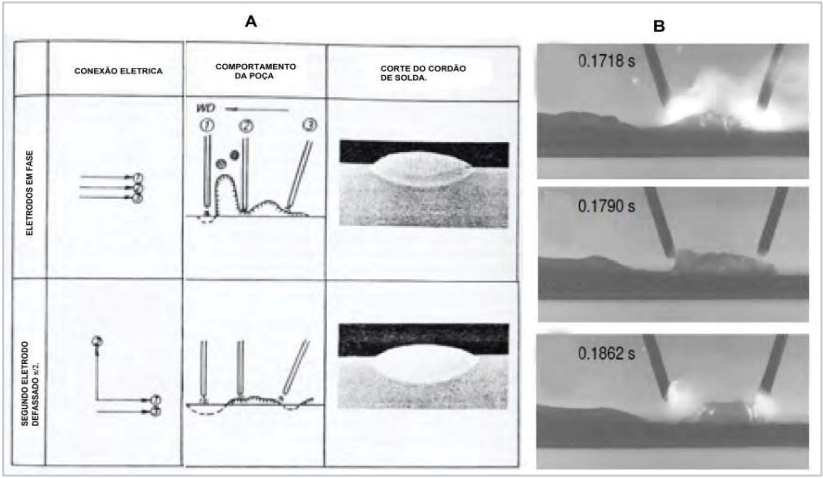
Alem da interferência sobre o arco quando da utilização de dois ou mais eletrodos, tema comumente tratado na literatura, problemas de extinção do arco apresentam-se na operação de baixos valores de corrente media. Em experiências com MIG/MAG pulsado, Ueyama [58] observou que a extinção do arco é produzida majoritariamente quando existe defasagem de pulsos entre os eletrodos. Esta extinção é produzida no eletrodo durante a corrente de base. O autor mostrou que no

incremento da corrente de base a frequência de extinção é reduzida, esta redução relacionada à rigidez do arco associada à magnitude da corrente [58,59].

Além dos efeitos provocados sobre o arco, Nomura [60] em ensaios com arco submerso (SAW) utilizando três eletrodos com CA comprovou que estas forças eletromagnéticas afetam a poça e a coluna do arco.

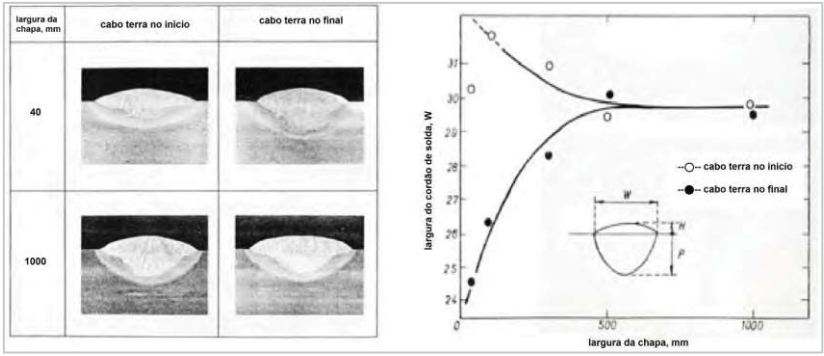
Nomura Inicialmente observou mediante fluoroscopio de Raio-X comportamentos distintos na superficie da poça, estes dependentes do ângulo de defasagem entre os eletrodos com CA, mostrados na Figura 26. O autor mostra diferenças mais marcadas na dinâmica da poça do que na geometría do cordão de solda. Na Figura 26a (acima), grande quantidade de material fundido é amontoado entre os dois primeiros eletrodos, tambem acompanhado de salpicos. Este fenómeno, explica o autor, tem maior relação às correntes de terra do que as correntes em cada eletrodo. Na Figura 26a (abaixo), este fenómeno é aplacado mediante a defasagem de 90° no eletrodo do meio em relação ao outros dois eletrodos, coneção conhecida como Scott. Tambem Reis [61] mostra em um dos seu ensaios com MIG/MAG tandem em modo curto circuito controlado certa acumulação de material fundido entre os dois eletrodos, o que chama de efeito "bola de neve", Figura 26 B.

Figura 26 - A)Comportamento da poça e geometria do cordão de solda dependendo da configuração elétrica em soldagem com arco submerso[60]. B) Sequencia de fotografias em soldagem MIG/MAG tandem CCC, é vissivel acumulação de massa entre os eletrodos [61].



Nomura [60], tambem experimentou a influencia do efeito de borda (da chapa) e sua relação com a largura da chapa. Na utilização de uma chapa com a largura suficiente a influência do cabo terra pode ser desprezivel, mas numa chapa estreita a influência é visível. A Figura 27 A mostra o caso para uma chapa de 40 e de 1000 mm de largura. Tambem o autor descreve o caso de expressivas diferenças na geometría do cordão de solda ao mudar a posição do cabo terra, Figura 27 B.

Figura 27 - Esquerda, distintas seções dos cordões de solda de acordo ao posicionamento do cabo terra e a largura da chapa. Direita, relação da largura do cordão contra a largura da chapa e o posicionamento do cabo terra. Adaptado de [60].



2.4.5 Transferência Metálica de Arame Adicional

Dentre os distintos processos de soldagem com adição de arame, o TIG alimentado com arame frio é o que maior informação oferece sobre os distintos modos de transferência e suas denominações.

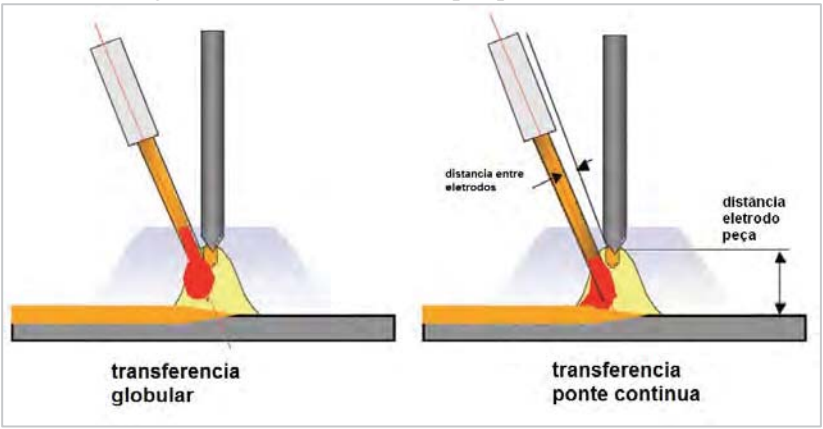
Fortain [62] e Da Cunha [63] descrevem dois modos de transferência do arame frio para a poça no TIG alimentado, de acordo à velocidade na qual o arame se aproxima ao arco e a poça. O primeiro modo, que acontece em baixa velocidade de alimentação do arame adicional, é caracterizado por uma sequencia repetitiva que inicialmente forma a gota no extremo do arame. A gota cresce até cair por gravidade e arraste pelo arco, até ser atraída por tensão superficial à poça. Este tipo de transferência é caracterizado pela mínima taxa de deposição e apresenta as seguintes particularidades: melhora a retirada de gases da poça e proporciona uma microestrutura fina e regular mediante a

oscilação da poça por contato repetitivo com a gota, também incrementa a largura da poça, entra as principais. [62,63].

Fortain [62] descreve que o tamanho da gota é maior quanto menor a velocidade do arame adicional, pudendo atingir de três a quatro vezes o diâmetro do arame e muito próxima do tamanho da gota no MIG/MAG globular.

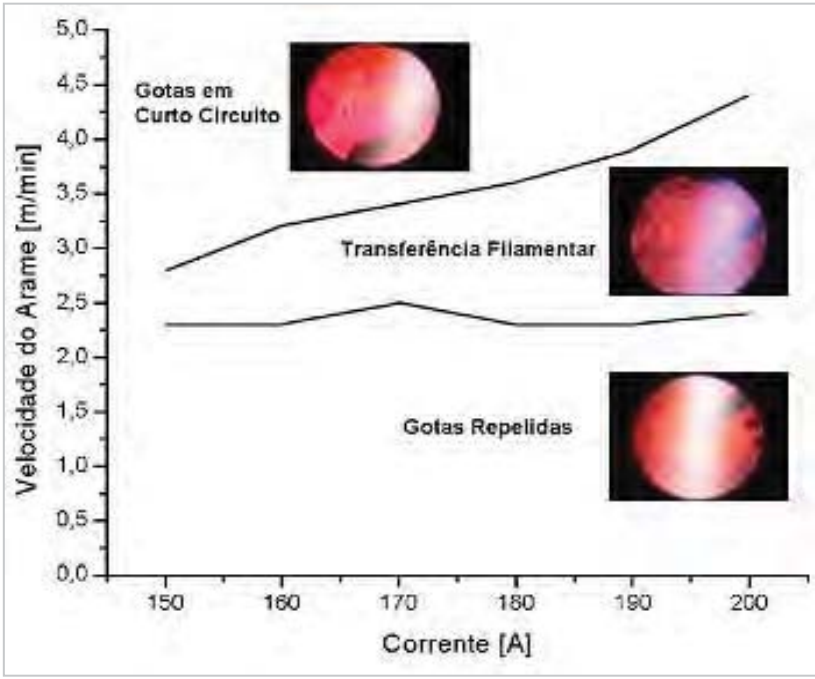
O segundo modo, acontece quando a velocidade de alimentação de arame adicional e a energia transferida pelo arco alcançam o equilíbrio. Um contato continuo se estabelece entre o arame adicional fundido e a poça. Dentre as principais características deste tipo de transferência são: Transferência muito estável com alta deposição e combinada com incremento na velocidade de soldagem, cordão de solda fino e liso. Sobre este tipo de transferência Fortain comenta a possibilidade de controlar a penetração e ainda minimiza a oscilação da poça. Na Figura 28 pode ser observado o esquema destes tipos de transferência e a nomenclatura empregada por Fortain para estes dois tipos de transferência, Globular e Ponte Continua. [62]

Figura 28 - Dois modos básicos de transferência no TIG alimentado. A. transferência globular; B. Transferência por ponte continua. [62]



Outra forma de definição da transferência é definida por Oliveira [4]. O autor define em seu trabalho com Plasma-Alimentado os seguintes termos: Gotas Repelidas, Transferência Filamentar, Gotas em Curto Circuito, ver Figura 29.

Figura 29 - Distintos modos de transferência Plasma com alimentação de arame frio [4].



Por outro lado, Kopecky [65], a soldagem TIG com alimentação de arame quente apresenta as seguintes como vantagens em relação à alimentação de arame frio: A possibilidade de desarticular a quantidade de energia empregada no arco da quantidade de arame introduzido na poça. A possibilidade do controle da rampa de inicio/fim no ciclo de soldagem.

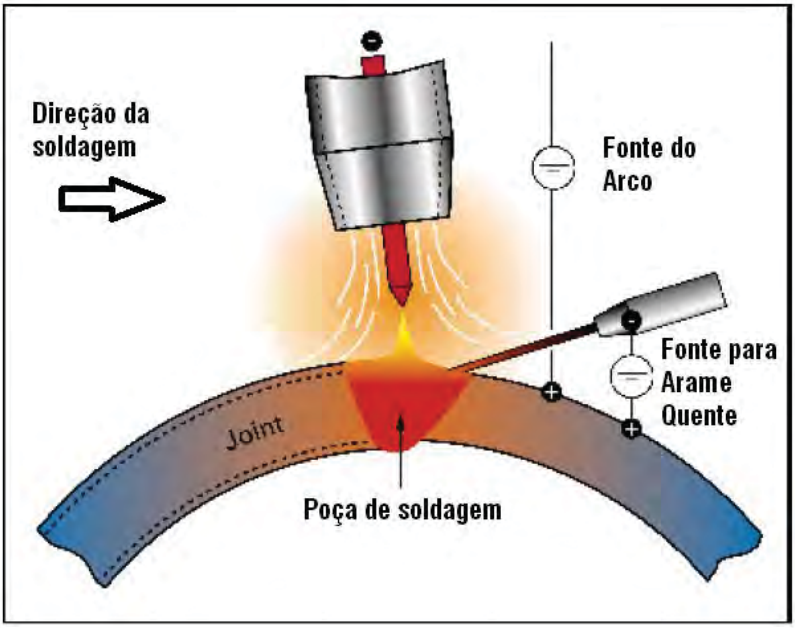
Cabe destacar que o arame quente por sua alta taxa de alimentação, comparado com o arame frio, é transferido normalmente como ponte sólida, como mostra a Figura 30. Entre as aplicações do TIG alimentado com arame quente o autor cita as seguintes: Soldagem orbital de todos os passes aplicados em todas as posições para tubulações de espessura media como de maior espessura, para soldagem de chapa a partir de 15 mm de espessura. Esta modalidade possibilita a preparação de junta estreita e processos de revestimento com menor diluição do que o processo TIG convencional [65].

Finalmente Ribeiro [64] realiza uma recopilação dos distintos modos de transferência para o arame adicional no processo TIG.

Basicamente são descritos quatro modos de transferência: globular, goticular, meia ponte e ponte completa, estes os nomes adotados neste trabalho.

> [...] A globular, para baixas velocidades de alimentação e o arame não avança dentro do arco podendo a gota assumir valores maiores que o diâmetro do arame. A goticular, em que o arame não toca a poça, permanecendo dentro do arco assumindo à gota, valores menores ou até maiores que o diâmetro do arame. E a transferência por ponte, que pode apresentar duas variantes, a ponte completa e a meia ponte, sendo que na ponte completa todo o diâmetro do arame é imerso na poça. A meia ponte é caracterizada por fração do diâmetro do arame ser imerso na poça, diferenciando-se portanto da completa. [64].

Figura 30 - TIG alimentado com arame quente. Destaca-se o modo de transferência do arame como ponte sólida. Também a mesma polaridade no eletrodo TIG como no arame quente. Adaptado de [65].



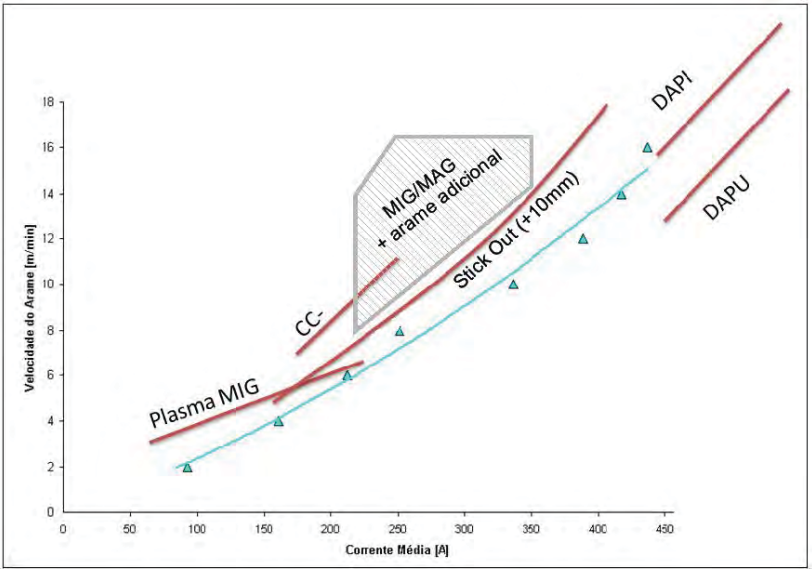
2.5 MAPA COMPARATIVO

Sobre a Figura 2, taxa de fusão do arame ER70S-6 de 1,2 mm, na Figura 31 foram colocadas de modo aproximado a taxa de fusão dos distintos processos tratados no Capítulo 2. Em resumo: CC-, Manipulação do *Stick-out* (+ 10 mm), Tandem e Twin MIG Potencial único DAPU e potencial isolado DAPI, e Plasma MIG.

Também, sobre a mesma Figura, foram colocadas de modo circunscrito (na área listrada) as experiências com inserção de arame, tema abordado no Capitulo 2-4 e resumido na tabela 2.

O MIG/MAG com adição de arame mostra sobre este mapa Va-I ganho em quanto à taxa de fusão. As experiências recopiladas podem ser resumidas dentro da seguinte faixa: para o eletrodo com arco se aplicou uma velocidade de arame entre 6 a 11 m/min. Para o arame extra se adicionou entre o 25% até o 100%. Entre os dois arames se adicionou máximo 16 m/min. Assim foi levantado o mapa seguinte.

Figura 31 - Mapa comparativo da taxa de fusão para ER70S-6 de 1,2 mm contra outros processos derivados do MIG/MAG. Também inserido a faixa na qual foram realizadas distintas experiências MIG/MAG com adição de arame, Adaptado sobre [9].



3. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo global o estudo e desenvolvimento de uma técnica de adição de arame frio ou quente ao processo MIG/MAG. Mediante a qual se amplie o universo de aplicações do MIG/MAG, decorrente da maior flexibilidade da relação entre material aportado e a corrente empregada no arco. Assim pode-se melhorar a eficiência e a eficácia do processo MIG/MAG.

A fim de desenvolver esta técnica de soldagem com adição de arame, a meta inicial será adequar uma bancada integrada com duas fontes de soldagem visando à adição de arame frio ou quente com distintas polaridades. Será necessário também desenhar e implementar o gabarito para acople das tochas que permita testar distintas configurações de posição na inserção do arame adicional, assim como desenvolver os periféricos (hardware e software) para implementação prática do processo.

Com base nos primeiros ensaios foram estabelecidos os seguintes requerimentos: posição da inserção do arame adicional, a relação entre o arame adicional e o arame no arco, a corrente empregada para determinada velocidade de arame adicional no caso de inserção de arame quente. Estas irão permitir mapear a faixa operativa de cada modalidade e comparar com o processo convencional e outros processos estudados. Como meta final se tem a aplicação prática e avaliação da técnica em duas aplicações reais.

A partir destes resultados são promissórios os seguintes benefícios da adição de arame frio/quente:

- Incremento da velocidade de soldagem em relação ao processo fundamental,
- Diminuir o risco de perfuração por excesso de fusão, ou *burn-through*,
- Redução de distorções nas chapas ao diminuir a energia de soldagem,
- Diminuir a fusão da peça,
- Melhorar o desempenho do processo em soldagens fora de posição a fim de evitar o escorrimento de material,
- Na utilização do modo de transferência goticular, reduzir a geração de fumos, respingos e salpicos como foi descrito no cap. 2.4.3.

4. MATERIAIS E METODOLOGIA

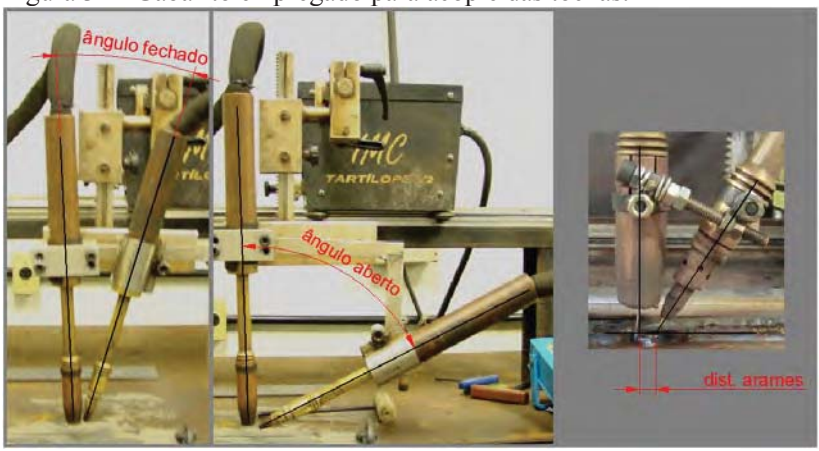
4.1 EQUIPAMENTOS

4.1.1 Gabarito para Acoplamento de Duas Tochas MIG/MAG

De modo simplificado esta variante do processo pode ser entendida como o acoplamento do MIG/MAG com um sistema de abastecimento extra de arame, seja este frio ou quente. Assim o primeiro passo, de acordo à metodologia adotada, foi a construção do gabarito para acoplar duas tochas MIG/MAG (Figura 32) com os seguintes requerimentos:

- Alinhamento dos arames no eixo de deslocamento.
- Liberdade no ângulo entre o arame principal e o arame secundário, aprox. 30°-60°.
- Liberdade na distância entre arames 3-15 mm.
- Emprego de tocha refrigerada para o arame adicional.
- Possibilidade de ajuste do ângulo de trabalho e de ataque.
- Robustez e leveza.

Figura 32 - Gabarito empregado para acople das tochas.



4.1.2 Deslocador

O deslocador foi o Tartilope V2 acondicionado a uma nova versão do sistema de controle que permitiu incrementar a velocidade de deslocamento linear até 5 m/min. No entanto foi necessário reduzir a folga entre o trilho e as rodas do deslocador na finalidade de reduzir a amplitude de vibrações no eixo Y, desde que, nos primeiros ensaios foi observado que uma mínima variação na distância DBCP ou desalinhamento na junta compromete a uniformidade do cordão de solda. Com a mesma finalidade também foi reduzida a menor distância possível entre o eixo transversal (Y) do trilho e a tocha. Este sistema mostrou bom desempenho até 4,5 m/min., acima desta velocidade apresentou eventual trancamento.

4.1.3 Fontes de Soldagem

A fonte empregada para o eletrodo principal foi uma DIGITEC 600, multiprocesso, transistorizada, chaveada no secundário do transformador. A regulagem desta fonte, para os ensaios iniciais em depósito sobre chapa e levantamento de dados, foi mediante o controle da corrente. Para as aplicações praticas o processo mostrou melhor desempenho com controle da tensão.

A fonte empregada para o arame adicional foi a INVERSAL 450. Esta fonte chaveada no secundário foi escolhida pela capacidade de fornecer corrente alternada (fonte inversora), devido à vantagem desta modalidade em diminuir o sopro magnético, como descrito no Cap.2.5.4. Para esta modalidade da fonte (AC) foi requerido do emprego de uma fonte de tensão que permita emular a tensão do arco aberto, uma vez que, caso a fonte detecte uma tensão menor que 12V ativa o modo de curto circuito, elevando a corrente (CC) até o arco abrir. Esta fonte de tensão foi adaptada por pessoal especializado do Labsolda/UFSC.

4.1.4 Sistema de Aquisição Portátil (SAP)

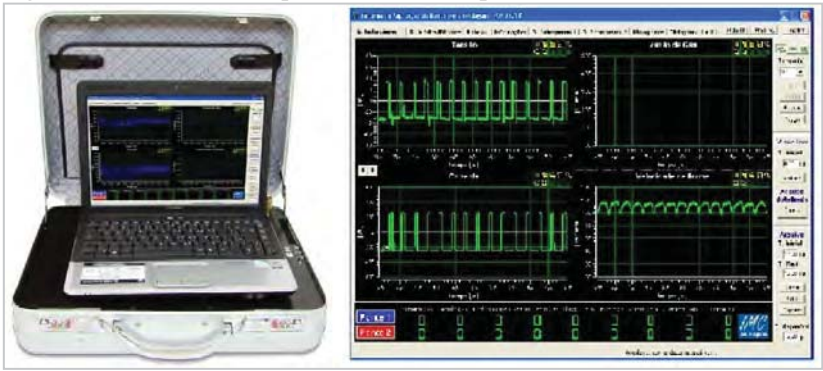
O sistema portátil de monitoração de processos de soldagem é uma ferramenta para análise do processo de soldagem. Este equipamento, na Figura 33, permite a leitura das grandezas de corrente, tensão velocidade de arame e vazão de gás para duas estações de soldagem numa taxa de amostragem de 5000 pontos por segundo para cada variável. [66]

A interface gráfica da versão SAP v 4.0 para ambiente Windows permite apresentar as leituras de valores instantâneos em forma de oscilogramas e permite exportar estas variáveis para outras aplicações do sistema operativo. O programa permite ainda visualizar os valores médios e acumulativos das distintas grandezas e exportar em formato gráfico (BMP ou JPG) para sua impressão [66]. A seguir na tabela 3 suas principais características:

Tabela 3 - Principais Características do Sistema de Aquisição de Dados Portátil.

Comunicação através da porta USB;
Conversores AD de 10 bits;
Faixas de medição: corrente -600 a 600A; tensão -100 a 100V; vazão de gás 0 a 20l/min;
Velocidade de arame 0 a 25m/min.
Taxa de aquisição: 5 kHz;
Autonomia da bateria: 10 horas

Figura 33 - Sistema de aquisição de dados portátil [66].



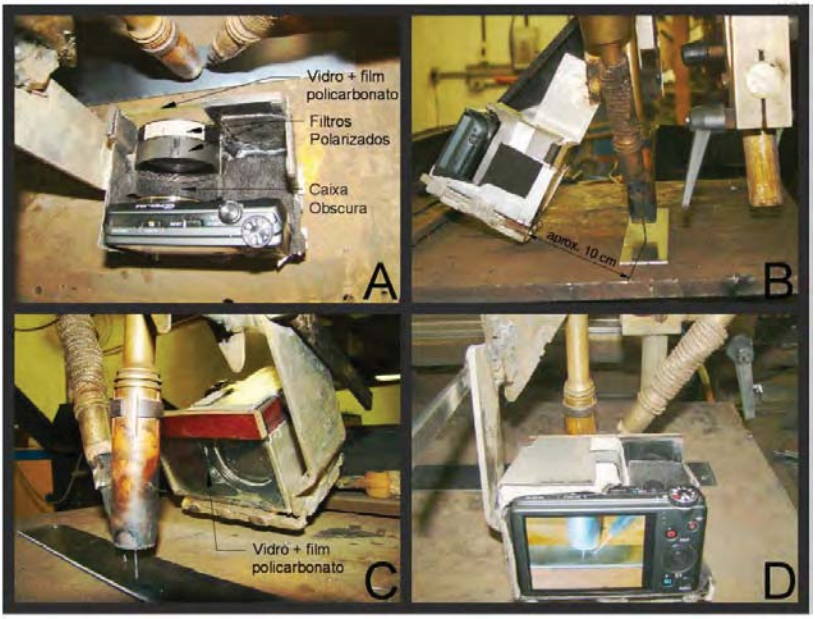
4.1.5 Registro da Imagem

Na finalidade de registrar fotograficamente os distintos eventos deste trabalho foi empregada uma câmera digital de uso doméstico (CASIO EX-ZR100), mas com a capacidade de disparos contínuos. Esta câmera ainda permite filmagem de alta velocidade em taxas de 240, 480 e 1000 quadros por segundo, em detrimento da qualidade da imagem quanto maior a taxa de aquisição de imagem. Contudo esta filmagem foi

suficiente para analisar inclusive a dinâmica do sopro magnético na utilização de corrente alternada, como relatado no capítulo 5.3.4 e 5.3.6.

Por outro lado, esta câmera de baixo custo e massa (aprox. 300 g), comparada com uma câmera profissional de alta velocidade, permitiu montar esta sobre a tocha aproximadamente a 10 cm do arco, como observado na Figura 34. Deste modo, foi simplificado o registro fotográfico do processo de soldagem com a câmera acompanhando a tocha, contrario ao artifício muitas das vezes empregado em laboratório na fixação da tocha e a câmera com o deslocamento da peça.

Figura 34 - A) Disposição da caixa acondicionada para a câmera incluindo o vidro protetor com filme adesivo de policarbonato e filtros polarizados. B) Distancia aproximada do arco. C) Vista frontal. D) Objetivo visualizado na tela da câmera.



Tanto para melhorar as condições de aquisição da câmera como para sua proteção foi acondicionada uma caixa que permitisse adaptar dois filtros polarizados para limitar a entrada de luz. Externamente foi colocado um vidro protetor com filme de policarbonato do lado do arco para evitar os respingos colar no vidro, ainda facilitou a limpeza da

fumaça. Esta caixa também foi revestida internamente de flanela preta a fim de impedir qualquer reflexo (Figura 34a).

4.1.6 Câmera Infravermelha

Com a finalidade de estimar a temperatura de inserção de arame quente foi empregada a câmera termográfica FLIR SC500 do LABTERMO (Laboratório de ciências térmicas/UFSC). Esta câmera de medição sem contato, observada na Figura da Tabela 4, permite a estimação da temperatura superficial de um corpo a partir da medição da radiação infravermelha emitida por este corpo e captada num sensor plano (bolômetro). As especificações principais da câmera na Tabela 4, a seguir [67].

Tabela 4 - Características principais da câmera infravermelha.

Características	Especificações
Rango espectral	Comprimento de onda infravermelha
Sensor	320 X 240
Material do sensor	Microbolômetro
Precisão	2% ou 2 °C
Faixa da medição	-20 a 500 °C
com filtro	-20 a 1500 °C
Sencibilidade Termica	<.10 @ 30 °C
Rango dinámico	14 Bit
Ajuste da emissividade	.10-1.00
Temperatura de operação	-15 a 45 C
Massa da câmera	3.5 kg
Tamanho da câmera	0.20 X 0.12 X 0.11 metros
Distancia focal	0.46 metros ao infinito.

4.1.7 Desentortador de Arame

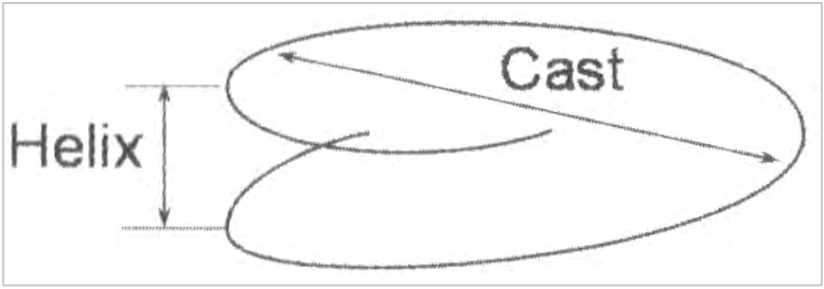
Uma das características dos arames está relacionada com a memória elástica dos mesmos durante o embobinamento, Scotti [20]. Assim ao sair o arame do bico de contato pode não manter a forma reta, ainda formar uma espiral. O mesmo autor utiliza as palavras inglesas *cast* e *helix* que definem esta espiral, como mostrado na Figura 35. O termo *helix* é o passo entre cada hélice, *cast* se relaciona à abertura diametral desta hélice.

No caso da soldagem com duplo arame é preciso o alinhamento no sentido do deslocamento. Leve desalinhamento pode produzir assimetria na poça, falta de fusão do arame adicional ou ainda, no caso

do arame quente, sopro magnético do arco oblíquo ao plano de deslocamento a seguir sobre a junta, ver Cap.5.4.

A fim de evitar o desalinhamento entre os dois arames se recomenda a utilização de um dispositivo para endireitamento dos arames, comumente chamado de "desentortador". Para o caso, empiricamente é achado o ajuste apropriado dos roletes assim como a posição para evitar o empenamento do arame ao sair do bico de contato.

Figura 35 - Efeito do *cast* e *hélix* no arame. [20]



Além dos implementos principais o laboratório dispõe tanto dos materiais como dos equipamentos para elaboração das macrografias requeridas a fim de obter os dados geométricos de cada solda como largura, penetração e reforço, dentre os principais.

4.2 MATERIAIS

O material adotado tanto para os ensaios como para as aplicações práticas foi similar ao material atualmente empregado nas duas aplicações práticas a serem levadas de modo comparativo. Assim os corpos de prova foram realizados com aço SAE 1020, este material disponível no laboratório em distintas espessuras.

Para os ensaios em depósito sobre chapa tanto com arame frio como com arame quente foram empregadas chapas de 12.7 mm de espessura a fim de diminuir o empenamento em depósitos sucessivos, estas chapas de 300 mm de largura. Para os ensaios comparativos com as aplicações práticas foram empregadas similares espessuras e condições às originais. Também estes corpos de prova elaborados em 300 mm de comprimento. Além destes corpos de prova, para o teste de depósito sobre chapa por sobre os 3 m/min. foi empregada chapa de 2 mm de espessura e 500 mm de comprimento a fim de incrementar a faixa na qual o processo apresenta-se com estabilidade.

O arame empregado foi o AWS - ER70S-6 de 1.2 mm, este arame similar ao empregado nas aplicações a comparar. Embora na soldagem periférica da roda do trator atualmente seja feita com arame de 1.0 mm de diâmetro, a utilização de um único diâmetro de arame visa à simplificação dos ensaios.

Finalmente o gás de proteção empregado foi qualquer que permitisse a transferência goticular. Entre estes gases se prevê empregar as seguintes misturas ofertadas comercialmente:

Ar + 2% O2

Ar + 8% CO2

Ar + 2%O2 + 8%CO2

4.3 METODOLOGIA

A premissa fundamental desta técnica de adição de arame no MIG/MAG é a de incrementar a produtividade numa melhor conjunção entre a energia e o material aportado e fundido, ainda reduzir a geração de fumos assim como respingos e salpicos no emprego de transferência goticular como descrito no cap. 2.4.3. Deste modo o primeiro passo visa avaliar a faixa na qual cada um dos seus principais componentes cumpre com a premissa proposta.

O primeiro elemento, o eletrodo com arco, aporta energia e massa ao processo de soldagem. Devido a que, a energia do arco é a principal fonte para a fusão dos elementos a se unirem, o primeiro passo antes de inserir o arame adicional foi determinar as condições de arco mais adequadas a receber o segundo arame.

O segundo elemento (o arame adicional) aporta massa, mas também pode aportar energia que será de uso quase exclusivo para elevar a temperatura na qual este arame pode ser inserido. A inserção de arame afeta ao processo fundamental tanto na ação do arco sobre os elementos a serem unidos como na dinâmica da poça e geometria final da solda. Por outro lado, no uso de arame quente a corrente através deste desvia tanto o arco como a transferência metálica. Assim será observada a melhor condição para a inserção do arame adicional e seus limites de aporte de massa e energia.

Com base nos resultados obtidos a análise geral visa avaliar a relação de admissão de arame adicional contra o processo base tanto com arame frio como quente em distintas configurações, como observado na Figura 36. Também procura o incremento na produtividade e influência sobre a geometria da solda e suas possíveis

aplicações. Finalmente este processo será levado a confrontar duas aplicações práticas frente a processos avaliados em cada aplicação.

De acordo aos objetivos propostos e à informação preliminar, os ensaios foram levantados em três etapas abaixo detalhadas:

ELETRODO PRINCIPAL (ARAME COM ARCO ABERTO).

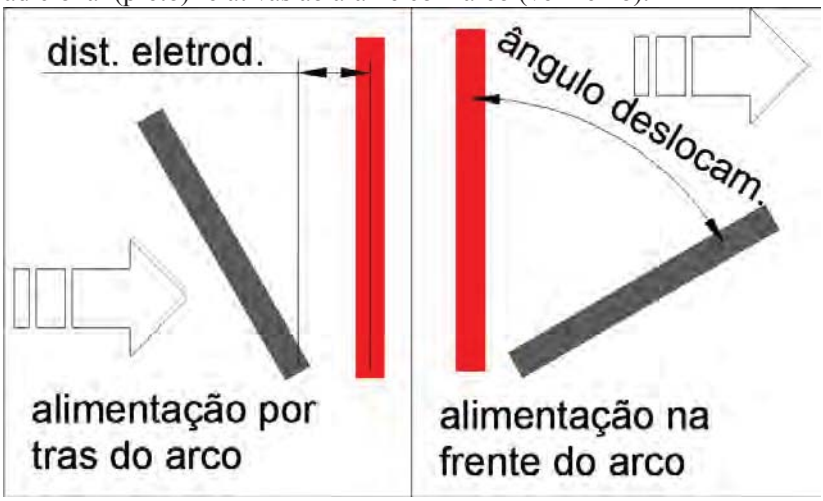
- Estabelecer no eletrodo principal os parâmetros para a condição que ofereça alta produtividade, qualidade e estabilidade ao processo. Como foi descrito no capítulo 2.1 a faixa de destacamento goticular é o modo que oferece estas características. Os testes visam à estabilidade deste modo quando inserido arame adicional.
- Observar o desempenho do Arco e a transferência metálica no eletrodo principal dependente do posicionamento e velocidade de inserção do arame secundário assim como os efeitos da corrente de aquecimento do arame adicional.
- Observar a redução de fumaça e respingos ou salpicos no emprego de transferência goticular como descrito no cap. 2.4.3. em relação aos outros modos de transferência.

EXPERIÊNCIAS PREVISTAS SOBRE O ARAME SECUNDÁRIO (FRIO/QUENTE).

- Alvo de inserção do arame. Esta experiência visa obter a melhor posição do arame adicional a ser inserido relativo ao eletrodo principal a fim de se obter a fusão total do segundo arame.
- Ângulo de deslocamento e sua influência sobre a quantidade de material adicional admitido, assim como a geometria resultante.
- Inserção do arame na frente ou trás do arco (empurrando/puxando), idem ao item anterior.
- Valor da corrente para aquecimento por efeito Joule e sua relação com o consumo do arame extra. Controle dos eventos de abertura e extinção do arco. Maximização da corrente no arame secundário antes da extinção do arco, a relação tolerável entre as correntes de cada arame. Uso da polaridade positiva e negativa, assim como o emprego da corrente alternada em distintas frequências e sua influência no sopro magnético.

- Transferência Metálica, a ocorrência de cada tipo será observada de acordo à quantidade de arame adicional.
- Estabilidade na inserção do arame adicional e estabilidade na poça e no processo geral
- Limites da relação de adição arame adicional/arame no arco
- Velocidade de solda e geração de respingos relativos à produtividade. Velocidade de solda limite.

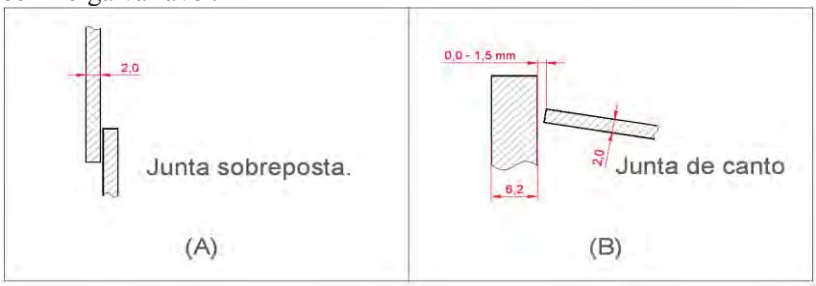
Figura 36 - Diagrama das variáveis de posicionamento do arame adicional (preto) relativas ao arame com arco (vermelho).



APLICAÇÕES PRÁTICAS

- Junta Sobreposta. Pretende-se comparar os resultados sobre esta aplicação, no que se refere à eficácia e eficiência contra o Tandem MIG/MAG, este processo já abalizado. Estes dois parâmetros de comparação serão medidos na Velocidade de soldagem e na energia empregada no arco por unidade de comprimento da solda. Ver figura 37-A.
- Junta de canto. Especificamente esta junta com folga variável (0,0 – 1,5 mm), numa faixa de tolerância relativamente ampla com relação à chapa de menor espessura 2mm. Do mesmo modo anterior, será comparada a eficiência e a eficácia deste com uma alternativa desenvolvida no LABSOLDA, o MIG/MAG PS *switch back*. Figura 37-B.

Figura 37 - A) Detalhe da junta sobreposta, B) Detalhe da junta de canto com folga variável.



5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são descritos e ilustrados os resultados obtidos para cada grupo de experimentos. Estes seguiram os procedimentos definidos no capítulo anterior. Os resultados são analisados e discutidos conforme as distintas variáveis e, finalmente comparados com os distintos processos derivados do MIG/MAG apresentados na Revisão Bibliográfica.

5.1 PARÂMETROS INICIAIS E INFLUÊNCIA DO SEGUNDO ARAME SOBRE O ELETRODO PRINCIPAL.

Como foi descrito na introdução, as premissas elementares do presente trabalho têm a finalidade de conjugar alta produtividade e qualidade, deste modo foi considerada a faixa do uso do eletrodo principal a partir da corrente de transição e abaixo da corrente em que o MIG/MAG apresenta instabilidade. Isto é aproximadamente entre 250 e 350 A para o arame ER70S6 de 1.2 mm, ou de acordo ao tipo de transferência, entre o goticular e transferência rotacional, como tratado no capítulo 2.1.

Por outro lado, a procura da maximização da relação de material fundido total com o material aportado no arco motivou que a experiência fosse realizada com o mínimo de material no arco, desde que fossem cumpridas as duas premissas anteriores, produtividade e qualidade. Portanto, foi escolhida a menor energia possível a partir da corrente de transição. Os valores de regulagem da fonte mostrados na Tabela 5, assim como uma fotografia do aspecto de transferência metálica (goticular). Estes parâmetros utilizados na maioria dos ensaios em depósito sobre chapa. Nessa condição foi constatada mínima geração de fumaça e ausência de respingos ou salpicos no regime de trabalho, corroborando as informações do capítulo 2.4.3.

Tabela 5 – Parâmetro inicialmente empregado para o eletrodo com arco.

Tipo Arame	**ER70S-6**
Bitola	1,2 mm
Corrente	260 A
Tensão	29 V
Velocidade Arame	7 m/min.
Gas	Ar+2% O2

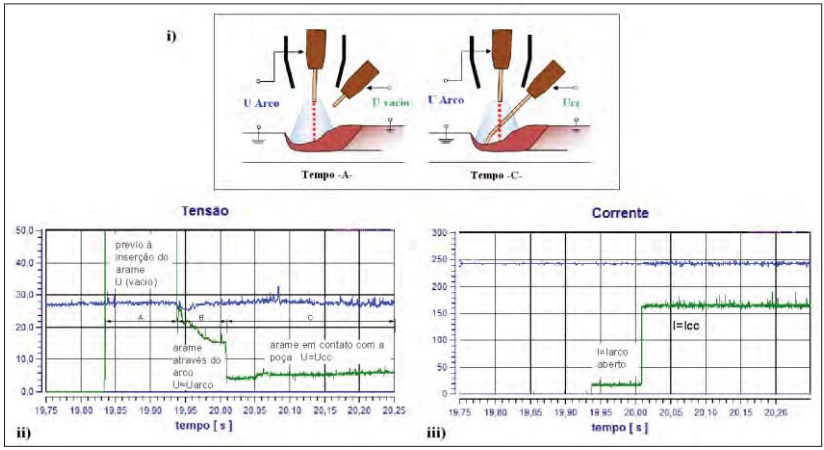
A partir desta regulagem na fonte os primeiros ensaios de inserção de arame mostraram que, quando inserido o arame através do eixo do arco ou dentro do arco provoca respingos similares, em sua forma, às encontradas no curto circuito forçado. A sequencia da Figura 38 mostra, neste caso, a inserção do arame quente. Foi escolhido este exemplo devido à facilidade para visualizar, no oscilograma da Figura 39, a queda de tensão no arame adicional (quente) no momento da inserção, contudo esta consideração aplica para arame frio também.

Na Figura 38, na esquerda, preliminar do arame a ser inserido e aquecido. Observa se, na fotografia do meio, que este arame adicional inicialmente frio é empurrado ao arco até atravessar este produzindo respingos. Na fotografia da direita, já o arame atinge o regime quando aquecido por efeito Joule. Também se observa o sopro magnético.

Figura 38 - Sequência de inserção de arame energizado na poça. Observa-se na fotografia do meio os respingos produzidos quando o arame ainda frio é empurrado, dobrado e levado dentro do arco. Os gráficos dos extremos mostram ausência de respingos, antes de ser inserido e em regime.

Cabe destacar que o arame ao atravessar o eixo do arco, e entrar em contato elétrico com a peça, torna-se uma extensão desta. Este fato, como se mostra na Figura 39 (i), provoca a redução do comprimento efetivo do arco. Por outro lado, do ponto de vista da tensão do arco (Fig. 39, ii), esta intervenção no eixo do arco não a modificou sensivelmente; já a corrente se manteve constante devido a se estar soldando com corrente imposta nas duas fontes (fig. 39, iii).

Figura 39 - i) Diagrama da inserção do arame adicional antes e depois da inserção, nos tempos -A-e -C-. ii) Oscilograma da tensão dos arames e definição dos tempos -A-B-C-. iii) Oscilograma da corrente. Em azul os valores para o eletrodo com arco, em verde os valores para o arame adicional.



O oscilograma da tensão mostra a interposição do arame através do eixo do arco e a pouca variabilidade da tensão do arco, em azul. Em verde, a tensão do arame adicional. No inicio do processo a tensão de vazio (Ua>50.0 V) está acima da escala do gráfico (tempo -A-). Após o arame se aproxima no contorno do arco (Ua ≈ Uarco, tempo -B-) e em seguida entra em curto circuito (Ua ≈ 5 V, tempo -C-) ou em regime.

Analisando-se o ensaio realizado do ponto de vista da estabilidade do arco, a primeira observação quanto à inserção do arame é de evitar inserir o mesmo através do arco, ou pior ainda, interseccionar a trajetória da transferência.

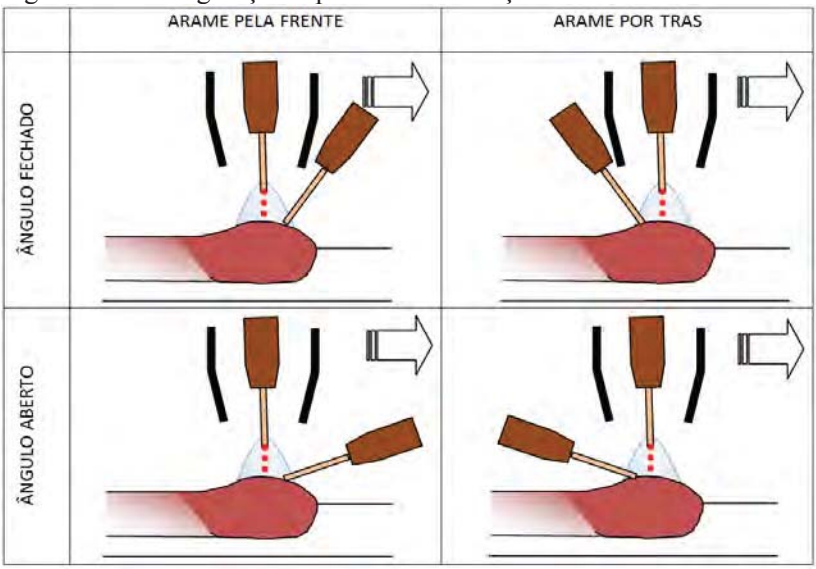
Por outro lado, no caso do arame frio, ao afastar o arame aproximadamente 2 a 3 mm fora do arco, foi observada forte limitação para fundir o arame, inclusive com baixo aporte de arame adicional (2.0 m/min de arame frio frente a 7 m/min no arco). Neste caso exclusivo ao uso de arame frio, o sistema se mostrou aleatório e com preponderância do arame colar na peça, ainda trancou o sistema de deslocamento.

Frente desta situação, na qual foi insuficiente a energia disponível na poça para fusão do arame frio, foi requerido aproximar o arame ao arco na periferia deste. Assim, é recomendável a inserção do arame frio sempre fora do eixo do arco, e na periferia do arco.

5.2 INSERÇÃO DO ARAME FRIO

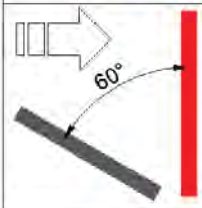
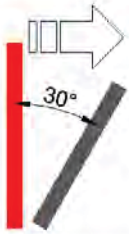
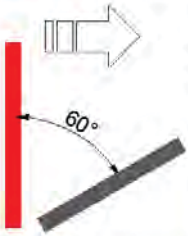
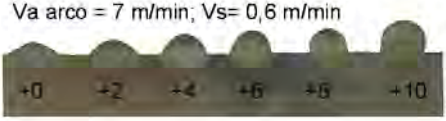
Sob o requerimento prévio, foram levantadas experiências de adição de arame frio em duas variáveis em relação ao posicionamento deste. A primeira variável toma em conta o posicionamento do arame frio relativo ao sentido de deslocamento do arco, na frente ou trás dele, como mostrado na Figura 40. A segunda visa o ângulo de inserção do arame extra, mostrado na mesma Figura. Foram utilizadas duas posições angulares em relação à tocha principal, estas denominadas ângulo fechado e aberto, aproximadamente 30° e 60° respectivamente.

Figura 40 - Configurações aplicadas na inserção do arame frio.



O arame com arco foi estabelecido nos parâmetros indicados previamente na tabela 5. O arame adicional foi inserido progressivamente enquanto se obteve fusão com estabilidade. Os resultados são mostrados nas macrografias da Tabela 6 em sucessivos depósitos sobre chapa previamente resfriada. A velocidade de soldagem foi 60 cm/min. Esta velocidade permitiu um tamanho da poça suficiente para a inserção do arame nestas configurações.

Tabela 6 - Distintos modos de adição de arame frio e respectivas progressões da Va.

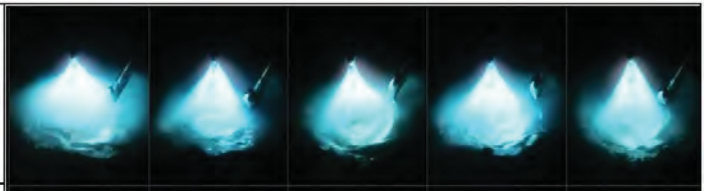
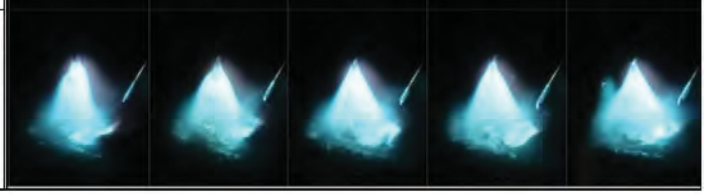
POSIÇÃO	DESCRIÇÃO
	Arame inserido por trás e num ângulo de deslocamento de aproximadamente 30°; ângulo fechado. Quando o arame inserido por trás, o limitante da alimentação secundaria pode-se sentir a partir dos 3m/min com constantes colisões do arame contra a peça. Também se observa falta de fusão. O perfil de fusão sa peça foi semelhante para cada sequencia. Abaixo o corte transversal dos cordões sucessivos. Va arco = 7 m/min; Vs= 0,6 m/min Va adicional
	Arame inserido por trás e num ângulo de deslocamento de 60°; ângulo aberto. Esta modalidade mostrou pouca constância. Pequenas variações na DBCP se traduzem em consideráveis modificações entre o ponto de inserção do arame adicional e o arco aberto. Esta forte variação mostrou o arame adicional sair pela frente do arco (sem se fundir) ou colar do arame na poça já sólida. Esta modalidade não foi empregada.
	Arame inserido pela frente e com ângulo de deslocamento de 30°; ângulo fechado. Esta modalidade mostrou estabilidade até os 3m/min. No incremento da Va percebeu-se bater do arame adicional contra a peça. Esta fortes batidas limitaram a inserção em 6m/min. Devido às constantes colisões esta modalidade não foi empregada. Foi observado leve redução na penetração. Va arco = 7 m/min; Vs= 0,6 m/min Va adicional
	Arame inserido pela frente e num ângulo de 60°; ângulo aberto. Esta modalidade permitoi o maior aporte do arame extra. Foi possível adicionar 10m/min inclusive. O limitante foi uma geometria de solda de improvável aplicação. A largura mostrou redução, o reforço incremento e a penetração forte redução, em relação à Va do arame adicional. Va arco = 7 m/min; Vs= 0,6 m/min  Va adicional

As distintas experiências mostradas anteriormente revelaram não só o evidenciado nas macrografias, mas também foi interessante do ponto de vista da transferência do arame adicional. Distintos modos de transferência foram observados, estes dependentes da quantidade de calor transferida do arco para fundir o arame antes de ser inserido na

poça. Em outras palavras, a velocidade com que o arame foi inserido mudou o tempo de exposição deste ao calor transferido pelo arco, determinando o comportamento da transferência. Cabe acrescentar que este ensaio específico dispensa a particularidade deste ser um processo de alta produtividade, considerando o teste inicial com adição de só 1,0 m/min. (+15%), mas a modo de informação fundamental considera-se relevante.

Em velocidade baixa no arame adicional (1 m/min.), na presença do arco, a ponta deste se funde mais rápido do que o avanço, até que o tamanho da gota faz com que esta desça na poça e seja transferida por tensão superficial. Este modo de transferência para o arame adicional é denominado por Ribeiro [64] como transferência globular, e observado no capitulo 2.4.5. Pode ser observada com detalhe na seguinte sequencia de fotografias a seguir na tabela 7.

Tabela 7 - Transferência do arame adicional entre um e dois m/min.

Va1= 7.0 m/min Va2= 1.0 m/min GLOBULAR	
Va1= 7.0 m/min Va2=1.5 m/min TRANSIÇÃO MEIA PONTE	
Va1= 7.0 m/min Va2=1.7m/min MEIA PONTE	
Va1= 7.0 m/min Va2> 2.0 m/min PONTE COMPLETA.	

Ao incrementar a velocidade a 1.5 m/min, ainda persiste o mesmo modo de transferência mais numa transição para a transferência por meia ponte, como é denominada pelo mesmo autor no capítulo 2.4.5. Estas duas modalidades na transferência também são mostradas nas sequencias da tabela anterior para Va adicional de 1.5 e 1.7 m/min.

Finalmente, conforme a velocidade foi incrementada, a partir de 2 m/min se observa a transferência por ponte completa. Em outras palavras a partir desta taxa de alimentação o arame é inserido majoritariamente sólido na poça. Este foi o modo de transferência para o arame adicional utilizado neste projeto.

5.3 INSERÇÃO DE ARAME QUENTE

Dentro deste estudo, a inserção de arame quente tem especial relevância devido à produtividade atingida. Estes resultados se evidenciam quanto levado em consideração a velocidade de soldagem e taxa de deposição, comparado ao processo original e outros derivados deste. A combinação dos incrementos de Vs e taxa de fusão total permitiu, de modo geral e a modo de "simbiose", incrementar notoriamente a eficiência do processo.

De modo similar à inserção de arame frio, será detalhado o alvo de inserção deste, a posição, distância e ângulo de inclinação referido ao arame MIG/MAG. Os resultados com arame quente abrangem a utilização da corrente para aquecimento por efeito Joule e sua incidência sobre o arco. Será abordada a forma de controle de corrente no arame adicional, os efeitos da polaridade e da utilização de corrente alternada.

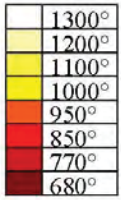
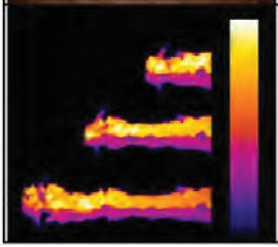
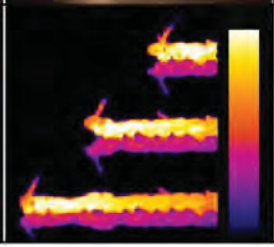
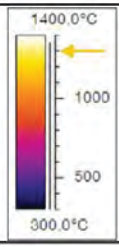
5.3.1 Aquecimento por Efeito Joule

Um dos tantos nomes que definem este processo é "MIG/MAG duplo arame com único arco" ou "MIG-DWOA" por suas siglas em inglês, como foi descrito por De Castro [41]. Este último nome, de maneira simples, define uma condição fundamental, só um dos arames pode manter o arco aberto entanto o outro basicamente transfere material em contato direto com a poça, o que possibilita também a condução elétrica. Na adição de arame quente, próximo da temperatura de fusão, existe a possibilidade da abertura do arco. Deste modo será mostrado neste item basicamente a limitação de potência necessária a fim de evitar a abertura do arco e sua relação com a quantidade de material aportado.

Foi realizado um ensaio somente com arame extra, sem o arco e com a tocha principal desligada. Especificamente procurou-se limite em que o material aportado fosse aquecido e sem que houvesse abertura de arco, a fim de maximizar a deposição total. Por outro lado também é requerido que o arame, sólido ainda, seja mole o suficiente para não transferir ao sistema de deslocamento os choques mecânicos. As seguintes fotografias, utilizando a câmera termográfica, na tabela 8 mostram o gradiente de temperatura do arame quente quando depositado sobre chapa e uma aproximação à temperatura na qual este é inserido, aproximadamente 1300 °C. Cabe expressar a existência de erros envolvidos e simplificações assumidas nos estudos termográficos, como variação de emissividade com a temperatura.

Para esta aproximação do valor da temperatura, por um lado, foi comparado contra a cor característica do aço incandescente e por outro, foram registradas distintas sequencias de termografias. Estes ensaios preliminares foram para uma mesma velocidade de arame (5m/min.) e DBCP de 15 e 25 mm. Outros valores como corrente e tensão, são detalhados na tabela 9.

Tabela 8 - Estimação da temperatura de inserção do arame quente.

DBCP = 15 mm, Va=5m/min.	DBCP = 25 mm, Va=5m/min.	REFERENCIA DE TEMP.
		
		

Na primeira linha desta tabela pode se estimar a temperatura (1200°-1300°C) atingida do arame com referência à incandescência do aço. A cor da ponta do arame foi comparada visualmente contra as

tabelas da cor da incandescência encontradas em [68]. Na segunda fila uma medição termográfica calibrada para uma emissividade recomendada de 0.8, mostra o valor máximo aproximado de 1300 °C.

Estas características físicas inerentes à temperatura determinaram a temperatura de inserção do arame em aproximadamente 1300 °C, sem a presença do arco. Na tentativa de relacionar o aporte de material (Va) com a corrente (I), os ensaios foram avaliados para duas variáveis: a DBCP e a Velocidade de Arame. A primeira variável, a DBCP, fixado em 15, 20 e 25 mm. A Velocidade do arame estabelecida em aproximadamente 5, 10, 15 e 20 m/min. Uma vez iniciado o abastecimento de arame, a corrente foi regulada até o inicio da abertura do arco, no limite de aquecimento, e imediatamente diminuída até que sua magnitude permitisse um regime constante. A fonte foi regulada em corrente.

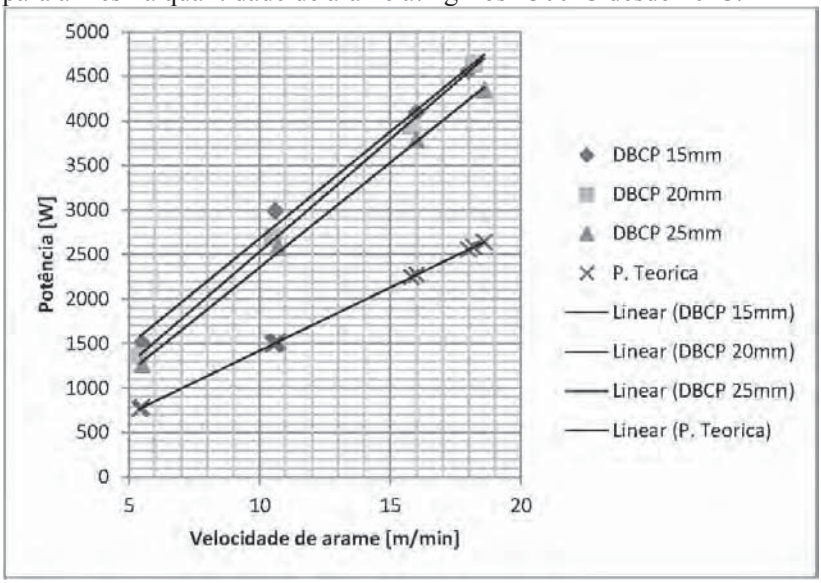
Foram medidas as distintas magnitudes como tensão e corrente em seus valores eficazes, e velocidade de arame, estes mostrados na Tabela 9; os valores de resistência e potência consumida foram calculados a partir dos anteriores. Em base destes foi constatado inicialmente que, basicamente, a potência mantém proporcionalidade com a quantidade de arame a ser aquecido, ou seja, em principio rege a proporcionalidade do principio de conservação de energia. Figura 41.

Tabela 9 - Ensaio da energia empregada para aquecimento do arame adicional.

DBCP	U [V]	I [A]	Va [m/min.]	Resist. [mΩ]	Potencia [W]
15	*9,3	*490	18,0	19,0	4557
15	8,8	465	16,0	18,9	4092
15	7,8	383	10,7	20,4	2987
15	5,8	260	5,5	22,3	1508
20	10,0	464	18,2	21,6	4640
20	9,2	428	15,8	21,5	3938
20	7,9	340	10,5	23,2	2686
20	5,8	235	5,4	24,7	1363
25	10,2	426	18,6	23,9	4345
25	9,5	398	16,0	23,9	3781
25	8,1	318	10,7	25,5	2576
25	6,0	210	5,5	28,6	1260

* Valores extrapolados devido à limitação da fonte (470 A).

Figura 41 - Proporcionalidade entre consumo de arame adicional e potencia empregada para distintos DBCP. Também a relação teórica para a mesma quantidade de arame atingir os 1300°C desde 20°C.



Na tabela 9, nota-se o valor da potencia máxima atingida, 4557 W para Va de 18 m/min e DPCP de 15 mm. Por outro lado, devido ao menor comprimento da extensão do arame e, portanto da resistência, a corrente necessária para aquecer o arame ultrapassou os 470 A, o limite da fonte. Este evento ativou a proteção da fonte INVERSAL 450, apesar da potência utilizada ter sido menos da metade da potencia nominal (13kVA). Neste sentido sugere-se desenvolver uma fonte de corrente específica para aquecer o arame, com devidas particularidades distintas às de uma fonte de soldagem convencional.

Tomando em conta a potência fornecida pela fonte foi comparada com a potência que teoricamente o arame requer para atingir a mesma temperatura. Na Figura 41 foi incluída a relação desta potência teórica, calculada de modo simples e requerida para aquecer o arame desde a temperatura ambiente 20°C até os 1300°C. Os valores para o modelo usado no cálculo foram baseados nas informações fornecidas por [70,71], são eles: Densidade do aço 7850 kg/m^3, e Calor específico médio 750 J/kg K.

Imediatamente saltam à vista duas questões, a primeira e a mais notória é que se requer de aproximadamente o dobro da potencia medida

comparada contra a potência teórica para aquecer a mesma quantidade de arame. A segunda questão é o paralelismo da relação Va/potência em relação à variação da DBCP, como indicador da proporcionalidade do princípio de conservação de energia, em outras palavras, a proporcionalidade entre a potência fornecida e a massa aquecida. Também esta proporcionalidade indica maior eficiência quanto maior a DBCP ou, menor a corrente requerida. O modelo utilizado para o calculo da potência teórica, a seguir na equação 5-1, esta relaciona a potencia consumida (P) com a taxa de alimentação do arame ($\dot{m}$).

$$P = \dot{m} \cdot \rho \cdot Cp \cdot \Delta T \qquad \text{eq. (5-1)}$$

Esta notória diferença em relação ao modelo teórico deixa este método para aquecimento de arame em aproximadamente 50% de eficiência. Esta diferença pode ser devido ao modelo teórico não ser adequado a esta situação, como também parte do calor seja transferido para o meio circundante, majoritariamente conduzido ao bico de contato. Esta ainda uma suposição.

5.3.2 Modelo para Aquecimento Limite do Arame Adicional.

A partir do modelo geral apresentado por Lesnewich [7], na Equação 5-2, o aquecimento limite do arame adicional inicialmente será aferido contra a segunda parcela, o termo que corresponde ao aquecimento por efeito Joule, marcado em negrito. Na Equação 5-3 o modelo a ser utilizado.

$$C = \alpha \cdot I + \boldsymbol{\beta \cdot L \cdot I^2} \qquad \text{Eq. (5-2) MODELO GERAL}$$

$$C_Q = \beta_Q \cdot L_Q \cdot I_Q^2 \qquad \text{Eq.(5-3) CONSUMO ARAME QUENTE}$$

Este modelo idealizado apresentou diferencias de aproximadamente +/- 10% de erro máximo para a família de curvas em distintos DBCP. A Figura 42 contrasta os dados do modelo contra os dados das experiências, na Tabela 9. Este resultado não pretende contradizer o modelo geral, o qual se ajusta a condições distintas, mas, frente à incerteza apresentada neste ensaio de aquecimento por efeito Joule, se buscará determinar as razões para tais diferenças.

Foi observado o comportamento da resistividade frente à corrente. Distinto do modelo geral no qual a resistência ($\beta \cdot L$) é

constante. Nas experiências realizadas, a resistência obtida em base da tabela 9 caracterizou-se de modo inversamente proporcional à corrente, para os três casos da DBCP, 15, 20 e 25 mm, na Figura 43.

Figura 42 - Modelo ajustado em base da minimização do erro quadrático médio e dados dos ensaios.

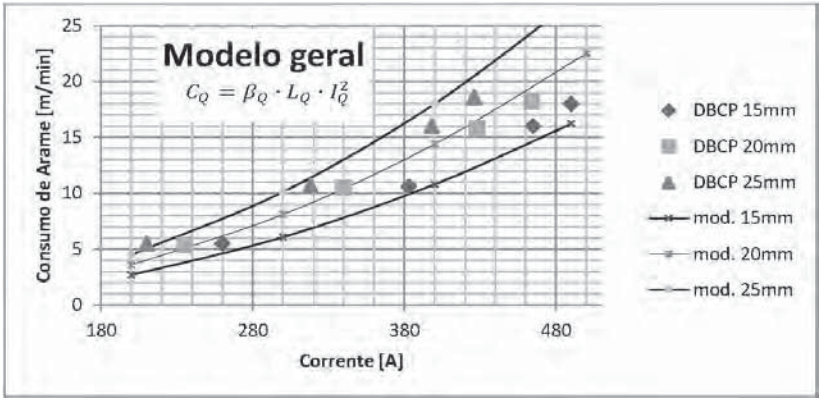
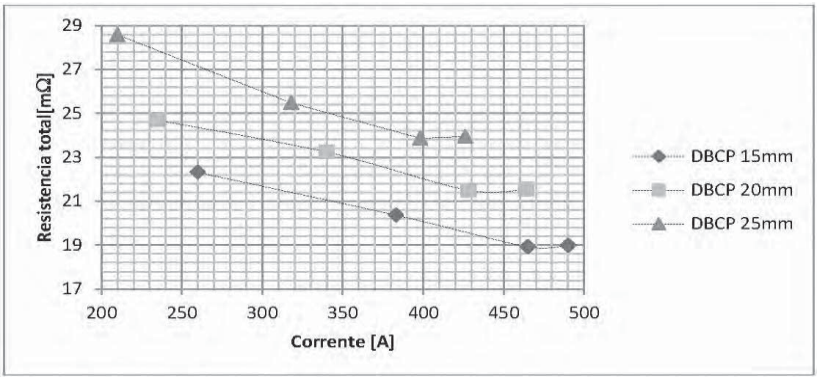


Figura 43 - Comportamento da resistência vs. corrente para distinto DBCP.



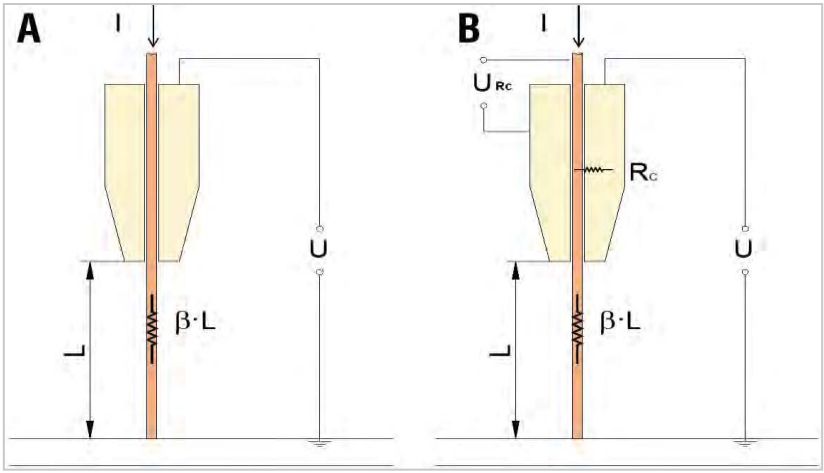
Este comportamento da resistência em função da corrente motivou a se criar um modelo para arame quente mais bem adaptado aos valores medidos. Assim foi considerada a possibilidade de que esta variação da resistência total seja variável da dinâmica de contato entre o arame e o bico de contato, da magnitude da corrente através desta e também da variação da temperatura. Na Figura 43, para qualquer DBCP, inicialmente a inclinação no segmento retilíneo, representada pela

relação dR/dI se mostra proporcional e negativa até aproximadamente 90 % da faixa de corrente para cada ensaio. A partir deste valor esta relação apresenta nulidade ou inclusive um leve incremento. Coincidentemente esta inflexão se produz próximo de $Va \cong 16\, m/min$, para cada série de curvas (DBCP), igualmente coincide com o ponto de sela. Assim este padrão repetitivo de dados pode ser representado num modelo genérico.

Na Figura 44-B, mostra-se a resistência de contato entre o arame e o bico, R_C, de forma física a mesma é resultante da superfície cilíndrica onde se produz o contato entre o arame e o bico. Esta resistência presumivelmente depende da dinâmica de contato, da temperatura influenciada pela corrente através desta e da capacidade de transferir o calor gerado para o arame, o bico e o meio.

Assim, na Figura 43, o primeiro segmento retilíneo pode se relacionar ao predomínio da dinâmica de contato por sobre a capacidade de transferir o calor gerado entre o arame e o bico. A partir da inflexão, a invariabilidade ou leve incremento do dR/dI pode ser entendido como o balanço entre a dinâmica de contato e o calor transferido, este dependente da magnitude da corrente. De acordo com este discernimento, valores maiores da corrente resultariam no incremento da resistência. Na Figura 47-A é ilustrado um diagrama para o modelo geral, e na Figura 44-B o modelo proposto.

Figura 44 – A. O diagrama para o modelo geral. B. O modelo que inclui a variação da resistividade de contato Rc devido à dinâmica entre o arame e a corrente.

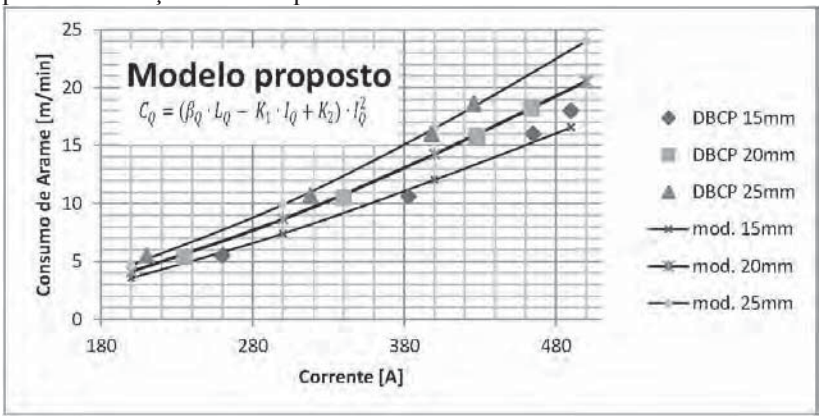


No modelo proposto a resistência total é o resultado de $R_C + \beta \cdot L$, Figura 44b. Devido ao comportamento da resistência apresentado na Figura 43, adotou-se a relação linear entre a resistência de contato R_C e a corrente, conforme apresentado na Equação 5-4, esta resistência poderia ser também medida como resultado do cociente entre a tensão U_{Rc} e a corrente I (Fig. 44b). Finalmente substituindo-se à resistência $\beta \cdot L$ do modelo geral, por $R_C + \beta \cdot L$ obtém-se a Equação 5-5. Aplicando-se este novo modelo sobre os dados medidos, obtiveram-se as curvas mostradas na Figura 45.

$$R_{total} = (R_C) + (\beta \cdot L) = (-K_1 \cdot I_Q + K_2) + (\beta_Q \cdot L_Q) \qquad \text{Eq. (5-4)}$$

$$C_Q = (\beta_Q \cdot L_Q - K_1 \cdot I_Q + K_2) \cdot I_Q^2 \qquad \text{Eq. (5-5)}$$

Figura 45 - Modelo proposto, para consumo do arame quente. Ajustado por minimização do erro quadrático médio



Este modelo proposto apresentou aproximadamente a metade do valor do desvio padrão em relação ao modelo inicialmente proposto.

5.3.3 Controle do Estado de Curto Circuito

O arame quente foi testado inicialmente no limite de corrente antes de abrir o arco e ser fundido totalmente. Não obstante foi percebida a ocorrência de abertura do arco devido a situações como não equilibrar a Va com a corrente fornecida, variação da DBCP durante o

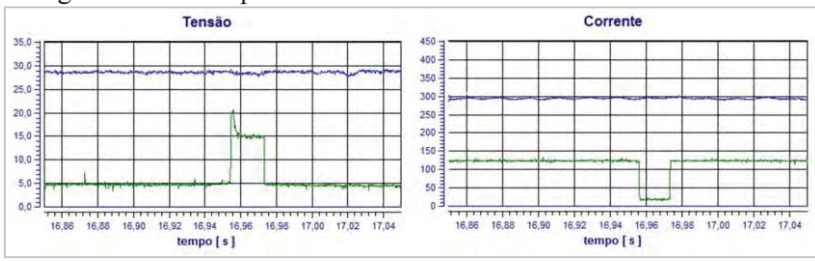
deslocamento da tocha ou calor em excesso proveniente do arco quando eventualmente o arame se encontrava na proximidade deste. Frente a esta situação foi utilizado um recurso da fonte de poder definir de forma discreta o estado de curto circuito e o estado de arco aberto de acordo à tensão de referência, aproximado de 12 V (INVERSAL 450).

Em condições normais a fonte opera no estado de arco aberto, caso o arame encoste na peça ou entrar em curto circuito com esta, o sistema de controle da fonte detecta esta situação mediante a identificação da queda de tensão do arco, elevando a corrente para abrir o arco. Para esta aplicação percebeu-se que seria possível utilizar este recurso, porém, ao invés de aumentar a corrente a ideia foi reduzir a corrente para que o arco não reabrisse.

O requerimento de o arame adicional ser inserido dentro da poça permuta a condição normal de arco aberto à condição de curto circuito. Em outras palavras, do ponto de vista da fonte a condição que antes era normal (arco aberto) vira eventual. Já a situação onde a fonte impõe a corrente de curto circuito que antes era eventual passa a ser de regime de aquecimento de arame. Assim, frente ao evento de abertura do arco a fonte ativa a corrente de arco aberto, só que estabelecida num valor insuficiente para manter o arco aberto, próximo dos 0 A (zero amperes).

A Figura 46, mostra um evento de abertura do arco controlado mediante a queda abrupta de corrente de 125 A em quanto estava em curto circuito, para 25 A, estado de arco aberto. Pode-se perceber o curto tempo de ocorrência de arco aberto (20 ms), recuperando-se rapidamente a situação desejada de manter o arame em contato com a poça.

Figura 46 - Evento de abertura de arco. O controle consegue, neste caso, extinguir o arco em aproximadamente 20 ms.



Apesar de que na maioria dos ensaios foi anulada a corrente de extinção do arco, constatou-se a possibilidade de simplesmente diminuir

a um nível que não permita a sustentação do arco. Esta condição incrementou o tempo da eventualidade do arco aberto proporcionando maior energia ao processo.

Na Figura 46, o patamar atingido na tensão em aproximadamente 15 V e durante aproximadamente 20 ms do estado de arco aberto oferece uma ideia da dinâmica do controle da extinção do arco. Assim, quanto menor a corrente (absoluta) no evento de arco aberto menor o tempo de extinção deste.

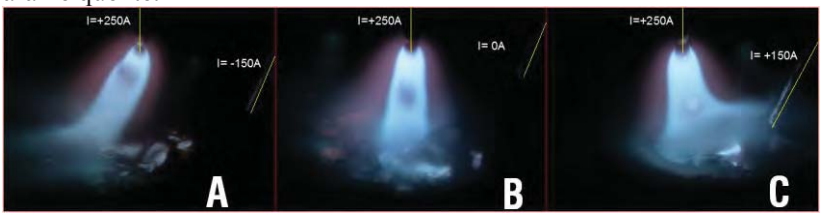
5.3.4 Sopro Magnético devido ao Efeito de Campo

O sopro magnético ocasionado sobre o arco pela corrente através do arame quente pode ser um limitante da relação entre material aportado no arame com arco e o arame adicional. São comparados os efeitos das variáveis como polaridade, e relação da magnitude da corrente entre o arame principal e o secundário sobre o sopro magnético do arco MIG/MAG.

5.3.4.1 Polaridade Utilizada no Arame Quente

Como foi descrito no Cap. 2.4.4, a ocorrência do sopro magnético sobre o arco depende do sentido do campo eletromagnético gerado pela corrente através do arame secundário, da magnitude da corrente, da distancia entre os arames e da magnitude de corrente no arco. Na Figura 47A e 47C é visível o sopro do arco, convergente e divergente, e dependente do sentido da corrente no arame adicional. Esperar-se-ia que o sopro magnético convergente fosse maior do que o divergente dado que o comprimento entre o arco e o arame adicional é reduzido. Ao contrário disto, em ensaios distintos foi corroborado que o efeito de troca da polaridade foi maior, comparativamente, no sopro magnético divergente que o convergente. Este último efeito associado ao escoamento favorável do plasma e do gás, na frente da poça (Figura 47A.), comparado à ortogonalidade deste fluxo contra a poça, no caso do arco convergir na utilização do mesmo sentido da corrente, Figura 47C. O desvio do arco associa também transferência de massa.

Figura 47 - Sopro magnético de acordo à polaridade empregada no arame quente.

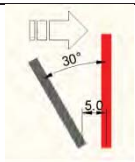
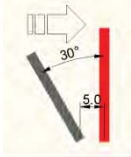
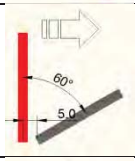
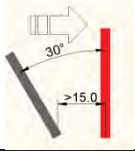


Por outro lado, na utilização de corrente negativa para seu aquecimento, e frente da possibilidade de abertura do arco no arame adicional, o fluxo de elétrons também é contrário. Isso ocasiona forte instabilidade no arco principal e um som altamente agudo caso o arame estiver próximo do arco.

Também o efeito do sopro magnético não só afeta o arco mais também a transferência, portanto assemelha-se ao efeito de inclinar a tocha, "empurrar a tocha". Esta deflexão pode causar excessivos salpicos e respingos direcionados para frente da poça.

Uma característica deste fenômeno é a rigidez do arco dependente da corrente, portanto da capacidade do arco para manter sua trajetória original. No entanto, observou-se que o sopro magnético é previsível desde que a relação entre a corrente do arco e a corrente do arame quente mantenha a proporção. Assim, pode se expressar que o sopro magnético fundamentalmente depende da relação entre a corrente do arco e a do arame adicional. De modo prático será estabelecida uma relação máxima entre a velocidade de arame no arco e sua correspondente no arame para as distintas configurações mostradas na seguinte Tabela 10. Outrossim, as condições mostradas na mesma tabela foram as possíveis, já descritas no item 5-2.

Tabela 10 - Relação máxima de adição de arame quente recomendável para algumas configurações de posição e polaridade.

CONDIÇÃO	RELAÇÃO MÁXIMA Va arco: (polaridade) Va arame quente
	(+) 1: (-)1.5
	(+) 1: (+)1.7
	(+) 1: (+)3
	(+) 1: (+)1 Sem efeito marcado no desvio do arco a partir dos 15 mm de afastamento entre os arames.

Acima destas relações o arco tende à extinção ou apresenta repulsão de material no caso do sopro divergente, a exceção do último caso no qual o limitante é a capacidade da poça em fundir o arame quente.

5.3.4.2 Uso da Corrente Alternada

Partindo da informação que a corrente alternada causa menor deflexão, como tratado no capítulo 2.4.4, esta modalidade foi testada. De fato o que se percebe “ao olho nu” quando o arco é afetado por um campo eletromagnético alternado é que este simplesmente se dilata num plano radial ao referido campo. Esta primeira afirmativa está limitada à capacidade do cérebro humano a perceber flutuação de luz acima dos 50 Hz [72], ou neste caso o sopro magnético por cima desta mesma frequência.

Basicamente foi conferido, mediante a filmagem em alta velocidade, que o sopro magnético não é eliminado, mas sim reduzida sua amplitude conforme a frequência da corrente alternada no arame adicional é incrementada. Assim, esta redução na amplitude do sopro magnético permitiria incrementar a relação entre a corrente no arco e a corrente através do arame quente. Os ensaios que sustentam esta afirmação são descritos a seguir.

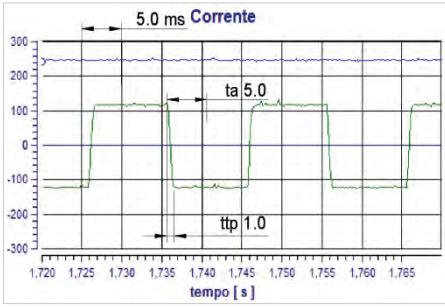
O primeiro ensaio com corrente alternada foi em 50 Hz numa com quadrada. O arame com arco foi fixado como na maioria dos ensaios (260 A, 7 m/min). Este primeiro ensaio mostrou que o desvio do arco persiste apesar da utilização da CA.

Foi observada, neste caso particular, uma dinâmica definida no arco entre a convergência e a divergência na mudança de polaridade. Existe um instante (t_a) para que o arco troque da divergência à convergência. Este instante (t_a) é maior do que a transição da polaridade (t_{tp}). O tempo em que o arco converge ou diverge é simétrico.

$$t_a > t_{tp}$$

Um vídeo em 480 quadros por segundo mostrou que o sopro magnético estabelece sua estabilidade entre 2 e 3 quadros após a troca da polaridade, ouseja, $t_a \approx$ 5 ms aproximadamente. Este valor é maior do que a transição da polaridade, neste caso $t_{tp} \approx$1ms, medido na Figura 48.

Figura 48 - Ensaio com arame quente em 50 Hz. A dinâmica do balanço do arco é maior do que a transição da corrente alternada. A corrente do arame quente em verde, a corrente do arco em azul. Do lado direito os parâmetros empregados.

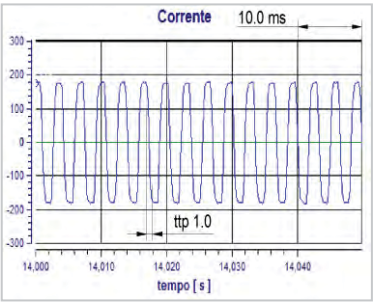


	Arco	Arame Quente
Freq.	-----	50 Hz
I eff	258 A	118 A
U eff	28,5 V	3,4 V
Va	7 m/min	4 m/min

Frente desta defasagem entre a dinâmica do desvio do arco e a transição do cambio da polaridade da corrente alternada foi incrementada a frequência visando à limitação da amplitude do balanço do arco, portanto a factibilidade de incrementar a relação entre a corrente no arame secundário e a corrente no arco.

Deste modo se fez uma experiência com uma corrente no arco menor à normalmente utilizada nos ensaios. Foi regulada a fonte do arco no modo pulsado sinérgico para uma gota por pulso de 1,1 mm diâmetro e 3 m/min de velocidade de arame. Os parâmetros na tabela que acompanha a Figura 49. Neste caso a corrente da base (I_b = 29 A) é a que está sujeita à extinção ocasionada pelo sopro magnético. Previamente foi testado o limite em que uma corrente contínua no arame quente poderia ser utilizada para esta corrente na base desde que não extinguisse o arco. O resultado foi de 60A para essa corrente da base, 29A, ou uma relação de I 1:2 em corrente.

Figura 49 - Oscilograma da corrente CA aplicada ao arame quente em 305 Hz. A corrente pulsada do arco não foi inserida para evitar saturação das imagens. Do lado direito os parâmetros empregados.



Arco Pulsado Sinergico		Arame Quente
Frequencia	76 Hz	305 Hz
Ip[A]:tp[ms]	300:4	-----
Ib[A]:tb[ms]	29:9	-----
I ef/Im [A]	170/110	154 A (ef.)
Uef/Um[V]	22.0/20	5.2 V (ef.)
Va m/min	3.0	4

Este caso demonstrou a possibilidade de incrementar a relação entre a corrente no arco e a corrente no arame quente quando este estiver com corrente alterna e 305 Hz. A relação obtida foi de aproximadamente I 1:5, quando comparado a corrente de base com a corrente no arame quente, 29A/154A.

No entanto, a possibilidade de incrementar a relação de corrente no arame quente limitada pelo sopro magnético mediante o uso de CA mediante o incremento da frequência, os resultados mostraram na prática que o MIG/MAG com adição de arame tem seu limite na

geometria do cordão de solda. Esta determinada pela elevada relação reforço/largura, antes do que pelo sopro magnético.

Por outro lado, e neste caso específico, a limitação da fonte no dI/dt (aprox. 400A/ms) e portanto no fornecimento de corrente eficaz (154 A) em 305 Hz, possibilitou a fusão de máximo 4 m/min. de arame de 1,2 mm ER70S-6. Em outras palavras, A corrente eficaz CA tem seu valor máximo no limite da frequência na qual o ciclo da corrente se assemelha a uma onda triangular/sinusoidal devido à inclinação dI/dt.

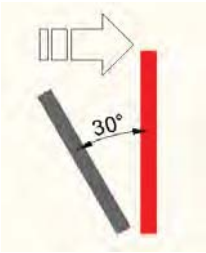
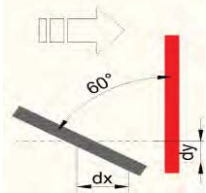
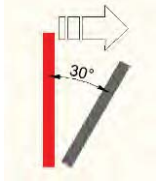
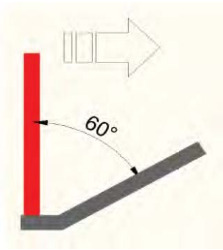
5.3.5 Posição Relativa do Arame Quente em relação ao Arco

De modo similar á inserção de arame frio, o arame quente também não pode ser inserido diretamente no arco devido à diminuição relativa do comprimento do arco. Quando inserido distante do arco, comparado com o arame frio que apresentou rápida solidificação deste com a peça e travamento do processo, neste caso, não foi inconveniente. Este modo de inserção permite sua fusão total e majoritariamente com o calor da poça, desde que este seja inserido próximo da temperatura de fusão (aprox. 1300°C).

Devido ao sopro magnético pela proximidade arame quente, este foi afastado como mínimo 5 mm entre os eixos do arame. Por outro lado este afastamento da zona ionizada mostrou melhor comportamento em quanto à possibilidade de abertura do arco e seu controle.

Com esta restrição e do mesmo modo em que foram testadas distintas posições relativas para inserção de arame frio, a Tabela 11, mostra, a modo de diagrama, os resultados relevantes para cada posição na utilização de arame quente.

Tabela 11 - Distintos modos de adição de arame quente e suas características principais.

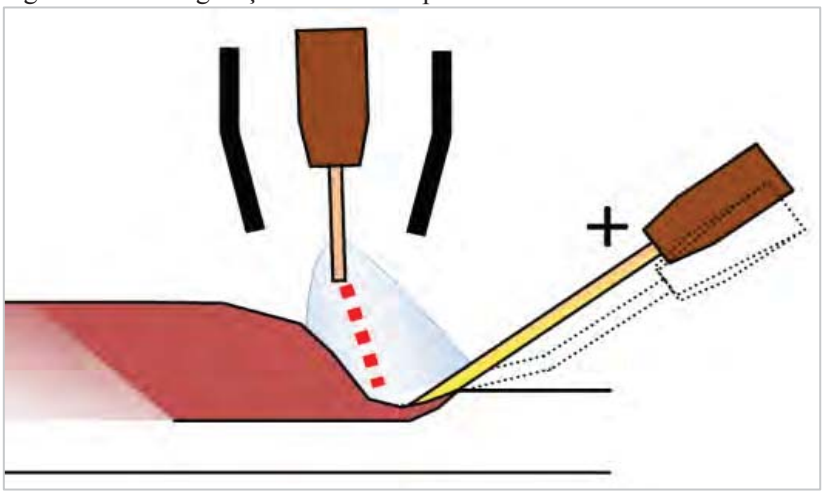
Posição	Descrição
	Nesta modalidade o processo demonstrou estabilidade. O arame quente inserido na poça contribuiu no desempenho em quanto aporte de material e velocidade de translação. Esta configuração foi a que melhor desempenho apresentou sobre os dois casos práticos apresentados inicialmente. Mantêm características geométricas semelhantes às do processo fundamental.
	Esta configuração não apresentou constância. Uma pequena variação no eixo Y (dy) amplifica uma considerável variação na distância entre os arames no eixo X (dx). Esta instabilidade perturbou tanto a poça como o arco. Esta modalidade não foi aplicada.
	Desde que a poça não esteja frente do arco, o arame nesta posição bate diretamente na peça e acumula material na frente do arco. A transferência do material depositado quente para a poça é de modo descontinuo podendo oscilar a geometria final da solda. Esta configuração não foi aplicada.
	Esta modalidade interpõe o arame adicional entre o arco e a peça. Caracteriza-se por reduzir fortemente a penetração, admitir a maior relação de arame adicional. A possível variação dx dada uma variação dy, foi absorvida pela flexibilidade do arame e sua capacidade de escorregar sobre a peça. Este foi inserido de modo ortogonal em relação ao eixo do eletrodo principal.

Cabe indicar que estas considerações foram por sobre o 100% de relação do material aportado, considerando se como premissa a alta produtividade. Pelo expressado anteriormente, nas tabelas, para as etapas seguintes somente foram utilizadas as duas configurações que permitiram a estabilidade do processo, detalhadas a seguir.

5.3.6 Inserção do Arame num Ângulo Aberto e Pela Frente do Arco

Esta modalidade, a última da tabela 11, permitiu forte diminuição na penetração, característica que resalta por sobre as outras configurações. Esta configuração está definida para possíveis aplicações de revestimento de alta produtividade comparado ao MIG/MAG convencional. A Figura 50 mostra as particularidades fundamentais desta configuração, a interposição do arame entre o arco e a peça, e a flexibilidade do arame para absorver as variações mecânicas.

Figura 50 - Configuração orientada a processos de revestimento.



A ação direta do arco sobre o arame não só diminuiu o agir do arco sobre a peça e, portanto a penetração, mais também esta interposição ou ação do arco sobre o arame adicional permitiu incorporar maior quantidade deste na poça comparado com as outras configurações.

De modo geral se pode afirmar que esta configuração permitiu a relação máxima em quanto ao aporte de arame adicional, comparado ao material aportado pelo eletrodo no arco, e no uso de corrente positiva. Esta relação foi aproximadamente Va 1:3. O limitante desta relação na falta de fusão ou descontinuidade na poça.

A Figura 51 mostra a geometria da poça para uma relação aproximada de aporte de material de Va 1:3, do lado a regulagem em

cada fonte. Resalta a baixa penetração e estabilidade durante a soldagem. Uma relação maior apresentaria falta de fusão.

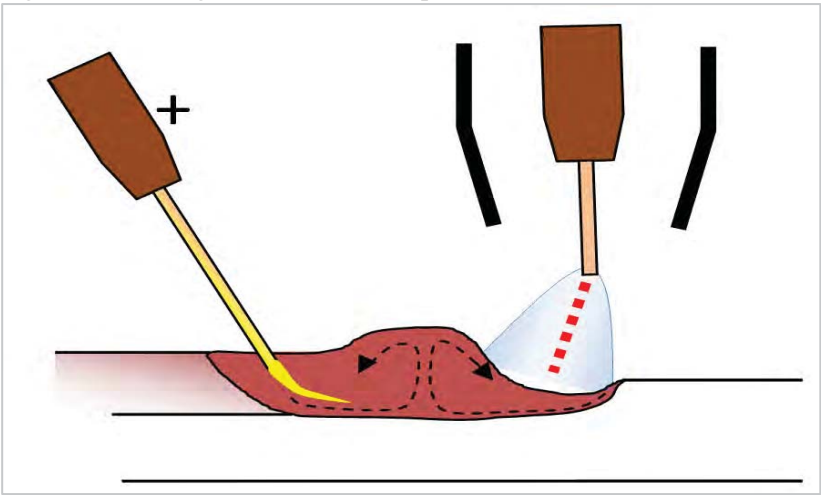
Figura 51 - Macrografia. Geometria com 12% diluição, poderia ser orientada a processos de revestimento. Na direita os parâmetros empregados.

	Arco	A. Quente
Va [m/min]	7	20
I [A]	+260	+470
U [V]	29	11
Vs[m/min]	1,0 m/min.	
Diluição %	12%	

5.3.7 Inserção do Arame num Ângulo Fechado e Trás do Arco

Esta configuração foi a que melhor adaptação teve para atingir os objetivos inicialmente apresentados neste estudo. Esta modalidade se mostrou totalmente estável quando incrementado o 100% de material adicional, ou seja, numa relação de Va 1:1 entre os dois arames. Uma relação inferior a esta o coloca fora da condição ótima de ganho de produtividade. Uma relação superior mostra uma geometria da solda excessiva com a largura. A seguir, na Figura 52, é ilustrada configuração e suas principais características.

Figura 52 - Configuração orientada a processos de união.



Além da explícita vantagem de adição de 100% de material, esta conjunção permitiu melhorar a condição em que o processo fundamental apresentaria mordedura ou *humping*, questões que muitas das vezes limitam a tentativa de incrementar a velocidade de soldagem, e portanto, a produtividade. Para o caso da mordedura, esta se apresenta aproximadamente no MIG/MAG convencional quando a Vs ultrapassar os 2.0 m/min. Na Figura 53, pode ser observada a mordedura no final da solda combinada com o recuar da poça, neste caso o material fundido recuo para se agrupar no final do cordão de solda coincidente no ponto onde foi desligado o arame quente. Também se observa a linha do fluxo de retrocesso no meio da fenda aberta pelo arco. As condições são mostradas na tabela do lado da mesma Figura 53.

Figura 53 - Mordedura produzida quando desligado o arame adicional aproximadamente 50 mm antes do final da chapa. Na direita os parâmetros empregados.

	Arco	Arame quente
Va [m/min]	18	18
I [A]	440	470
U[V]	33	12.8
Vs [m/min]	4.5	
Gás	Ar + 2%O_2	

Aparentemente a inserção do arame na cauda da poça modificou a dinâmica desta como mostrado na Figura 52, nas linhas entrecortadas. Este fenômeno sustentado na observação da acumulação eventual de material liquido entre os dois arames.

Esta configuração contribuiu para sobrelevar o evento do *humping* que se apresenta ao ultrapassar Vs>2.5 m/min no MIG/MAG convencional e em depósito sobre chapa plana [49]. Relembrando o tratado no Cap. 2.5.1 referente ao *Humping*, comentado pelo mesmo autor:

> [...] O forte momento cinético de retrocesso de fluxo de material derretido na poça que tipicamente ocorre quando utilizada alta velocidade de soldagem foi identificado como o maior fator responsável pela iniciação do *Humping*. [...] Isto sugere que qualquer variável no processo ou técnica de soldagem que ajude a dissipar ou reduzir o momento de retrocesso de fluxo do material fundido na poça promoverá maior velocidade de soldagem e produtividade [49].

Sem ter a certeza de como este fenômeno surge se pode presumir as seguintes causas para minorar o retrocesso de fluxo:

- Empurro mecânico da poça pela componente X do avanço do arame adicional, e o avanço da massa deste para uma zona com maior fluidez e próxima do arco.
- A ação mecânica do sopro magnético sobre a poça, tanto na transferência como no fluxo de gás de plasma.
- Redução do volume fundido na cauda da poça e redução do calor de fusão (calor latente).
- A combinação das anteriores.

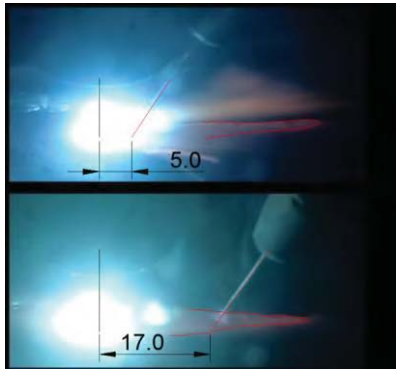
As primeiras tentativas visando aumentar a Vs com inserção de arame quente não deram bons resultados, inclusive piorou este efeito quando inserido arame quente próximo do arco, afastado aproximadamente 5mm do eletrodo principal. Cabe dizer que a inserção de arame energizado na proximidade deste incrementa os eventos de abertura do arco no arame quente, por outro lado o sopro magnético é pronunciado e limitante. Motivação essa para afastar o arame fora do arco em aproximadamente 10 mm fora do eixo deste.

Este afastamento só foi possível desde que a temperatura de inserção do arame seja próximo da sua fusão, 1300 C. Esta nova configuração mostrou acumulação de material entre os dois arames, mostra do contraefeito de retrocesso de fluxo, similar às experiências descritas por [60,61], no Cap. 2.4.4. Visando um dos ensaios práticos foi possível soldagem em 3 m/min com bom acabamento e repetibilidade, também foi atingido 5 m/min em depósito sobre chapa, esta velocidade limitada pelo deslocador. Ainda estes ensaios não só mostraram incremento na produtividade, mas também foi evidente a redução do

aporte térmico à peça. Observada mínima deflexão mecânica pós-soldagem e na possibilidade de simplesmente assegurar esta chapa de 500 mm no inicio e final do corpo mediante sargentos sem esta se ondular durante a soldagem. Do mesmo modo cabe salientar a qualidade desta modalidade quanto à baixa geração de fumos e respingos como descrito no cap. 2.4.3. Possa estar neste parágrafo de modo super-resumido a maior contribuição que modestamente este estudo oferece.

Este afastamento além de modificar a dinâmica e a forma da poça, também contribuiu resfriar a poça e portanto a fechar as isotermas por trás do arame quente. Na Figura 54, fotografia que mostra a variação da distância entre eletrodos, pode se comparar duas diferencias: a distinta distribuição da poça e o sopro magnético, notórios efeitos da inserção do arame por trás do arco num afastamento maior a 10mm.

Figura 54 - Diferençada forma da poça e o efeito do sopro magnético no distanciamento do arame adicional. Na direita os parâmetros empregados.



	Arco	Arame Quente
I	258 A	270 A
U	28,5 V	7.5 V
Va	7 m/min	7 m/min
Vs	3 m/min	

Este resfriamento da poça ainda pode ser suportado em termos de balanço de energia, no qual é desprezível o calor emitido por radiação do arco ao arame adicional assim como as perdas de calor deste ao ambiente. Em termos gerais a perda por radiação emitida pelo arco foi descrita por Lancaster [73,74], para o processo MIG/MAG, em aproximadamente 6,5%, ou aprox. 500 W neste caso, obtido em base da tabela 5. A partir deste valor, foi calculada a projeção emitida sobre o arame adicional (25 mm DBCP, diâmetro 1,2 mm) numa distância de 10 mm do eixo do arco e com uma inclinação de 0°, 30° e 60° em relação ao eixo do arco. A proporção irradiada sobre aquela área projetada foi de 2,4; 1,6 e 0,8 % da total, 500 W. Ainda o arame considerado como

corpo negro, a radiação se encontra na ordem das unidades até a décima de watts, um valor não representativo frente da potência de aquecimento por efeito Joule, aprox. 2500 W. Do mesmo modo foram desprezíveis as perdas por radiação e convecção deste arame para o meio. Esta aproximação deixa à energia da poça como o principal aporte para fusão do arame já aquecido, em contraste com as outras modalidades da inserção do arame em que é notória a ação do arco para sua fusão.

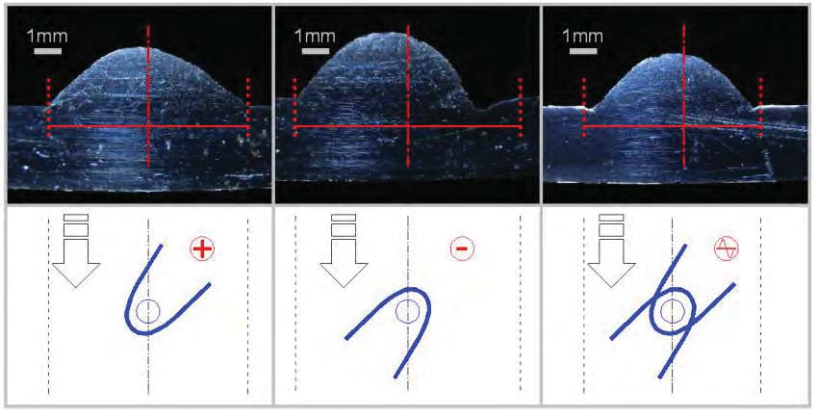
5.4 OBSERVAÇÕES NÃO PLANEJADAS

Dentre os múltiplos ensaios realizados nesta configuração, na inserção do arame por trás do arco, foram encontradas duas relações interessantes, apesar de estas não terem sido planejadas.

A primeira tem a ver com o uso de corrente negativa e corrente alternada e seu efeito sobre a dinâmica da poça, esta comparada com a corrente positiva. Este resultado foi decorrente de um erro no alinhamento dos arames na trajetória da soldagem. Observado a mordedura num lado só do cordão, no uso de polaridade negativa, devido ao sopro magnético direcionado para o frente do avanço e para o lado oposto do arame não alinhado. Por um lado este efeito atua de modo similar a empurrar a tocha e avança a poça desconcentrando-a dentre os dois arames. Por outro lado o desalinhamento balançou a poça de modo assimétrico do lado contrario da inserção do arame. Este desequilíbrio ocasionou rápida solidificação do lado da inserção de material adicional, coincidente com o lado de menor volume de material.

Ao contrário, a polaridade positiva concentra a poça entre os dois arames reduzindo este efeito no desalinhamento. O uso de corrente alternada mostrou um comportamento intermediário entre a polaridade positiva e a negativa. Estes ensaios mostrados na Figura 55 são acompanhados dos dados de regulagem das fontes. Este comportamento sustenta a ação mecânica do arco sobre a dinâmica da poça.

Figura 55 - Comportamento do arco (em azul) frente ao desalinhamento do arame adicional (em vermelho) no uso de distinta polaridade. Abaixo os parâmetros empregados.

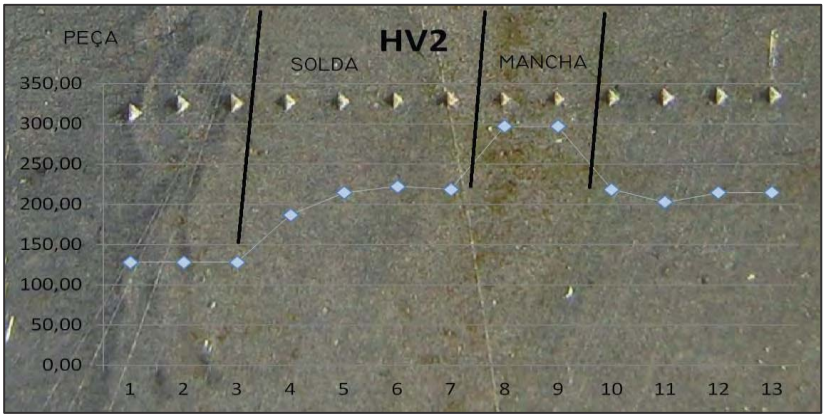


	Eletrodo arco	Arame adicional
Va	7 m/min	4 m/min
I eff	260 A	140 A (50 Hz em AC)
Vs	1,5 m/min	

O segundo acontecimento que se mostrou repetidamente tem a ver com a microestrutura da solda. Foi observada uma mancha em alguns casos como mostrado na Figura 56 e 57, também observada em macrografias de [43] ao inserir arame frio. Este fato, relacionado à inserção de arame frio e por trás da poça, deve ser considerado pois pode comprometer os requerimentos metalúrgicos ou microestruturais.

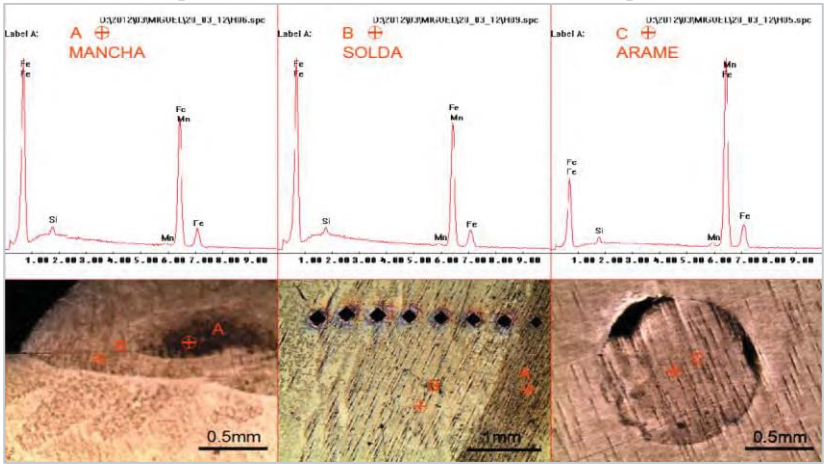
Foi realizado um corte longitudinal (Figura 57 no centro) no mesmo plano da chapa e constatado que esta mancha, revelada após o ataque com nital 2%, percorre o trajeto da inserção de arame adicional. Por outro lado verificado mediante o uso de microscopia eletrônica que não houve modificação substancial na composição final do material fundido comparado com o material de base ou inclusive com um traço de arame não fundido, pode se observar estes resultados na Figura 57. Também foi conferido, mediante o perfil de dureza (HV2), incremento na zona manchada, como pode ser observado na Figura 56. Finalmente foi observada, na mancha, mediante o uso do microscópio, maior formação de ferrita e perlita comparado ao restante da solda.

Figura 56 - Perfil de dureza HV2. Nota-se o incremento da dureza nas punções sobre a mancha. Os valores menores correspondem à peça, os intermediários à solda.



Em resumo, pode se dizer que neste ensaio específico existiu homogeneização na composição do material fundido mas alteração na microestrutura, este efeito possivelmente devido à solidificação e resfriamento com maior gradiente do que o restante da poça.

Figura 57 - Resultado do MEV. Comparativamente pode se apreciar a similaridade na composição química das amostras sobre a mancha e a solda, pontos A e B respectivamente, estas levemente distintas duma amostra da composição do arame ER70S-6 sem fundir, ponto C.

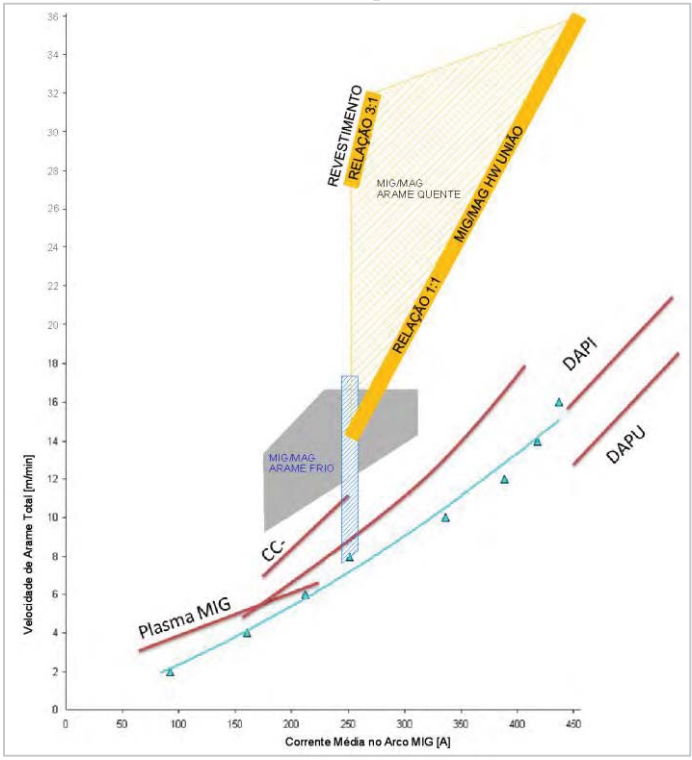


5.5 MAPA COMPARATIVO

O mapa comparativo da figura 58, é uma estimativa da faixa na qual a taxa de fusão do processo MIG/MAG com adição de arame ER70S-6 de 1,2 mm é aplicada, tanto para as distintas experiências com arame frio (na área listrada azul) como para as experiências com arame quente (área listrada amarela). Do mesmo modo em que foi apresentado no capítulo 2.6.

Para adição de arame quente, na faixa inferior o processo mostrou bons resultados na inserção de 100% de arame adicional até atingir 18 m/min em cada arame (Va total 36 m/min). Esta condição é recomendada para processos de união.

Figura 58 - Mapa comparativo para o arame ER70S-6 de 1,2 mm. Inclui a faixa (listrada) na qual foram levantadas as experiências com MIG/MAG com adição de arame frio/quente.

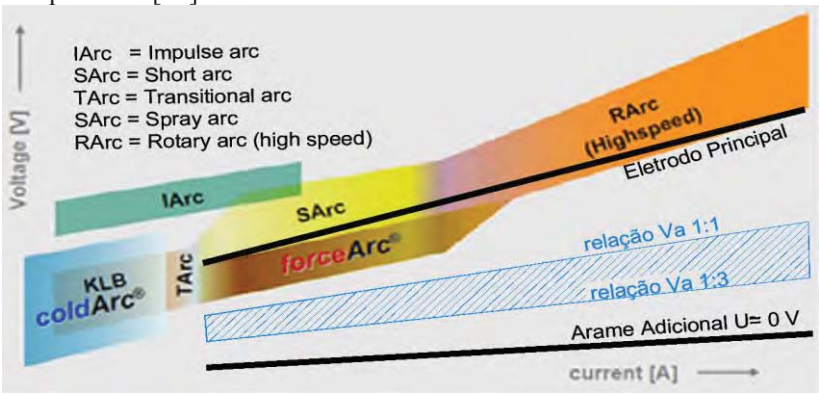


Para processos de revestimento pode ser inserida até três vezes a quantidade de arame no arco mais só na frente da poça e com ângulo aberto. Nesta modalidade o limite foi a velocidade de arame em 24 m/min para o arame adicional frente de 8 m/min no arco, mantendo a relação de Va 1:3 (total Va 32 m/min).

Para o levantamento da Figura 58 não é considerada a corrente no arame quente, desde que este possa se aquecido por qualquer outro método, inclusive por maçarico ou com outro arco [75]. Assim basicamente a Figura 58 mostra a capacidade do processo fundamental em aceitar o arame adicional. Ainda, se fosse somada a corrente no arame quente à corrente do arco, a taxa de fusão seria menor do que o MIG/MAG convencional.

Por outro lado, a fim de visualizar ao MIG/MAG com adição de arame quente como um processo frio o autor coloca de forma aproximada sobre um diagrama tensão-corrente a faixa na qual este processo se desenvolve, e de acordo aos resultados dos ensaios deste trabalho. Este mapa permite qualificar quanto "frio" é o processo. Neste gráfico de forma estimada o arame quente é um arame permanente em curto circuito e com tensão próxima do zero, a tensão na linha azul inferior. O eletrodo com arco, sobreposto no processo convencional, a linha azul superior. Finalmente a área na qual poderia se desempenhar este processo é marcada de acordo à proporção geométrica linear do aporte de material (Va 1:3 e 1:1), entre a tensão do arame com arco e a tensão do arame quente. Figura 59.

Figura 59 - Aproximação da faixa na qual o MIG/MAG com arame quente se desempenha e sua estimativa a este ser um processo frio. Adaptado de [25].



Outra forma de observar esta modalidade de adição de arame quente como um processo frio está na comparação do modelo geral de Lesnewich [7], expressado na Equação 5-6, contra o modelo para consumo do arame no MIGMAG CC explicado por Scotti [20], na equação 5-7. Esta última equação diferencia o tempo de arco aberto (t_{ab}) do tempo de curto circuito (t_{cc}). Assim no período do curto circuito $|_{t_{ab}}^{t_{cc}}$ unicamente o segundo termo é considerado, desde que o arame esteja em contato com a peça e o arco seja extinto.

$$C = \alpha \cdot I_m + \beta \cdot L_{el} \cdot I_{rms}^2 \qquad \text{Eq. } \textit{(5-6) MODELO GERAL}$$

$$C = \alpha \cdot I_m + \beta \cdot L \cdot I_{rms}^2 \,|_0^{t_{ab}} + \beta \cdot L \cdot I_{rms}^2 |_{t_{ab}}^{t_{cc}} \qquad \text{Eq. (5-7) MIG MAG CC}$$

A partir deste último modelo melhor ajustado à condição da dinâmica do processo MIG/MAG com transferência em curto circuito foi possível associar esta variante do MIG/MAG, como sendo a ocorrência de modo simultâneo do arco aberto no arame principal (transferência goticular) e o curto circuito no arame quente adicional.

Assim, esta modalidade MIG/MAG com adição de arame quente, pode ser nomeada como CURTO CIRCUITO HIBRIDO (*Hybrid Short-Circuit*). Esta última definição não só fundamentada na simultaneidade dos eventos, mas também no fato de este se apresentar comparavelmente como um processo de soldagem "frio" similar ao MIG/MAG curto circuito, CCC, STT, ColdArc, entre outras.

5.6 APLICAÇÕES PRÁTICAS

Devem se considerar estes ainda como ensaios próximos da condição real na indústria, no entanto, cada um é válido de comparação dada a similaridade no objetivo a ser atingido. Como foram expressas na introdução, as duas aplicações práticas foram escolhidas visando incrementar a produtividade em cada caso com considerações particulares:

- Soldagem horizontal em **junta sobreposta,** limitada pelo fenômeno do *humping* e escorrimento de material.
- Soldagem em **junta de canto,** esta limitada pelo fenômeno de "burn-through".

5.6.1 Junta Sobreposta

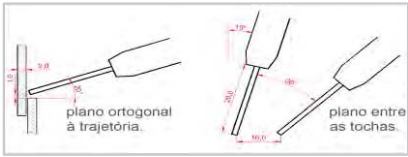
As características dos ensaios realizados com inserção de arame quente por trás do arco em depósito sobre chapa plana foram levados à prática para soldagem de duas chapas sobrepostas de 2mm e na posição horizontal. Foi escolhida esta modalidade pela velocidade atingida. Observa-se na Figura 60 a configuração utilizada. Á diferença dos ensaios anteriores em que o arame com arco foi inserido perpendicular à peça, neste caso foi requerido "empurrar a tocha" para reduzir o pronunciado reforço.

O resultado desta soldagem foi comparado contra uma amostra de soldagem de chassis realizada na posição horizontal e descendente 45°. Este ensaio ainda requer depuração para se aproximar às condições na indústria, inclusive pode se observar falta de penetração, porém não está longe e ainda possibilita a comparação.

Evidente é, tanto neste caso como na próxima aplicação, as diminuições na penetração e na fusão da peça. Esta limitação do agir do arco sobre a peça pode ser explicado na velocidade atingida, 3 m/min, e sua diminuição de calor energia imposta por unidade de comprimento. Como foi descrito por Scotti [20], existe uma relação entre o detrimento da penetração e alta velocidade. Em outras palavras, o arco carece do momento suficiente de agir sobre a peça mesmo na utilização de elevada corrente.

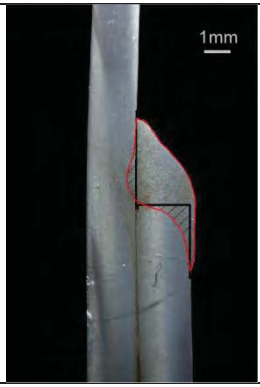
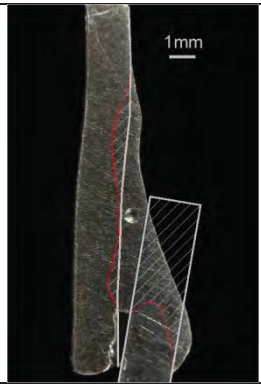
A partir desta marcada vantagem, na penetração reduzida e a velocidade de soldagem, unicamente foi requerido ajustar o volume necessário do material aportado para a junta específica. Inicialmente se trabalhou com uma relação de Va 1:1, ou seja, 7 + 7 m/min de cada arame de 1.2 mm ER70S-6, porem foi necessário incrementar em 1 m/min o aporte do arame quente para obter a geometria suficiente. O resultado na Tabela 12. Na mesma tabela foram colocados os valores de energia por unidade de comprimento empregada no arco e a velocidade de soldagem, estes comparados com o processo abalizado na indústria para este tipo de junta, o Tandem MIG. De modo comparativo, a energia empregada por unidade de comprimento e a velocidade atingida são indicadores da eficiência e da eficácia de cada processo. Também esta configuração não apresentou respingos ou escorrimento da poça, ainda poucos fumos, como descrito no cap. 2.4.3.

Figura 60 - Configuração detalhada do posicionamento da tocha para soldagem de junta sobreposta na posição horizontal. Na direita os parâmetros de regulagem de cada fonte.



	Arco	Arame Quente
I	258 A	330 A
U	29,5 V	6,9 V
Va	7 m/min	8 m/min
Vs	3 m/min	

Tabela 12 - Comparação do resultado da soldagem de Junta sobreposta.

	MIG/MAG HW	MIG/MAG Tandem
Geometria		
Energia/m	192 kJ/m	375 kJ/m
Vs	3,0 m/min.	2,4 m/min.

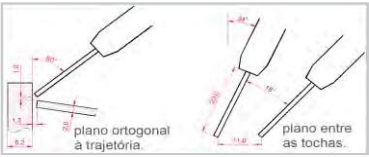
5.6.2 Junta de Canto

Esta aplicação foi escolhida visando evitar o “burn-through”. Do mesmo modo que no item anterior é apresentada a configuração utilizada e os valores em que foram reguladas as fontes, na Figura 61. Comparável à aplicação anterior a velocidade de 2.5 m/min propiciou menor penetração e fusão da peça. O resultado se mostra na Tabela 13, este comparado com o processo MIG/MAG Pulsado Sincronizado. A velocidade de soldagem foi limitada pela grande quantidade de material requerido para encher aquela geometria e pela característica procurada neste processo de baixa emissão de gases. No entanto esta redução na penetração foi em detrimento da possibilidade de absorver os pontos de solda de forma exposta utilizados no ensamble dos componentes.

Esse fato limitou a que os pontos de solda para a fixação da junta sejam colocados no mesmo lado da trajetória. Ainda assim, e devido ao menor aporte térmico que o MIG/MAG com adição de arame quente oferece, portanto da distorção, os pontos foram unicamente requeridos no extremo dos corpos de prova de 300 mm.

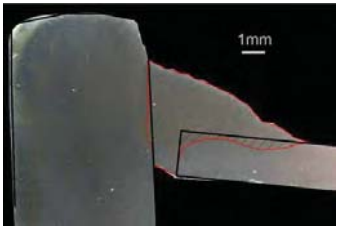
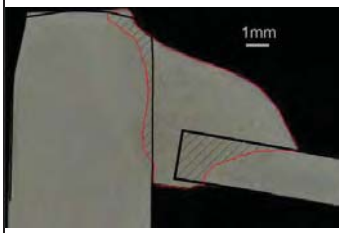
Por outro lado esta aplicação inicialmente apresentou descontinuidade no cordão de solda devido ao sopro magnético ocasionado pelo efeito da borda, efeito que sobressalta numa peça de comprimento relativamente curto. Este inconveniente foi aplacado mediante a proximidade de massas de ferro nos extremos do corpo de prova. O sopro magnético por efeito da borda observado em chapa de 300 mm seria desprezível numa aplicação de alta produtividade, a qual é recomendável em comprimentos maiores.

Figura 61 - Configuração detalhada do posicionamento da tocha para soldagem de junta de canto. Na direita os parâmetros de regulagem de cada fonte.



	Arco	Arame Quente
I	280 A	340 A
U	31 V	8,3 V
Va	10 m/min	10 m/min
Vs	2,5 m/min	

Tabela 13 - Comparação do resultado da soldagem da Junta de canto.

	MIG/MAG HW	MIG/MAG PS
Geometria		
Energia/m	312 kJ/m	865 kJ/m
Vs	2,5 m/min	0,6 m/min

CONCLUSÕES

- O processo MIG/MAG com adição de arame acentua-se na particularidade de ser uma técnica de soldagem fria (de baixo aporte de energia), na concepção inserida em soldagem, e de alta produtividade. Esta sinergia o distingue do MIG/MAG convencional e diversos processos derivados deste.
- A maior flexibilidade de manipulação da energia empregada no arco com a quantidade de material depositado, se obtendo uma geometria determinada, beneficia tanto a eficácia como a eficiência do processo.
- A utilização do arame frio é restrita a este ser inserido dentro do arco e da poça para sua total fusão. O arame quente possibilitou que este seja fundido na poça e viabilizou maior aporte de massa do que o arame frio.
- O arame inserido pela frente e com ângulo aberto (aproximadamente 60°) permite diminuir fortemente a penetração, esta é reduzida devido à interposição do arame entre o arco e a peça. Para esta configuração a relação máxima entre arame no arco e adicional foi de Va 1:1.5 para arame frio e Va 1:3 para arame quente. Esta modalidade é recomendável para processos de revestimento devido à interposição do arame adicional entre o arco e a poça.
- O arame inserido por trás e com ângulo fechado (aprox. 30°) mantém uma geometria de solda similar ao processo MIG/MAG convencional. A relação recomendável entre arame no arco e arame adicional é de aproximadamente Va 1:0.5 para inserção de arame frio e Va 1:1 para arame quente. Esta modalidade recomendável para processos de união.
- Distintos efeitos da inserção de arame quente por trás do arco permitiram que este processo fosse aplicado a uma velocidade maior de soldagem na qual o MIG/MAG convencional ver-se-ia restrito devido à ocorrência do “humping”. A velocidade limite atingida foi de 5 m/min.
- A utilização de corrente alternada, até 300 Hz, para pré-aquecimento do arame adicional não elimina o sopro magnético causado sobre o arco, mas, a amplitude deste efeito minora conforme a frequência seja incrementada. Deste modo é possível uma relação maior entre a corrente através do

arame quente e a corrente no arco e, portanto da relação na quantidade de material aportado.

- A vantagen sobre outros processos de alta deposição (Plasma-MIG, DAPI, DAPU, CC-, etc.) em relação à taxa de fusão foi comparada num mapa Va vs. I. Contudo cada processo derivado do MIG/MAG preserva sua característica particular.

RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Considerar o emprego de corrente de aquecimento do arame adicional acima de 500 A para a melhor compreensão do comportamento da resistência entre o bico de contato e o arame.
- A fim de conhecer melhor os fenômenos envolvidos no aquecimento do arame por efeito Joule, se recomenda estudar as perdas de calor (aproximadamente 50% em cálculos teóricos) no aquecimento do arame.
- Investigar combinações de diâmetros de arame e aplicação de arame tubular quanto à viabilidades, desempenho, dinâmica e a homogeneização da poça.
- Aplicar este método como técnica de união em soldagem de cordões maiores a um metro de comprimento, e comparar contra outros métodos de soldagem já empregados.
- Comparar este método em aplicações de revestimento contra outros procedimentos abalizados.
- Identificação e condução de melhorias na compilação de tecnologia (tocha, suporte, software de controle e interface, alimentador de arame e energia para aquecimento, deslocador, progressão na inserção do arame adicional), com concepção e realização de ensaios de rigidez e robustez do processo MIG/MAG com adição de arame.
- Estudar/modelar a distância de inserção do arame quente mais adequada em função da Vs, Va e corrente quando inserido por trás, relacionar estas variáveis com o comportamento da poça.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÂFICAS

[1] SILVA, Regis. Soldagem MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito controlado aplicada ao passe de raiz. UFSC: Dissertação-2005.

[2] RAMIREZ, Aldo Manuel. Análise e desenvolvimento do processo MIG/MAG duplo arame com potencial único. Posmec-UFSC-1999.

[3] MOTTA, Marcelo. Aplicação do processo MIG/MAG pulsado com duplo arame e potenciais isolados em soldagens de revestimento. UFSC-2002.

[4] OLIVEIRA, Moises Alves de,. Estudo da Soldagem Plasma com Alimentação Automática de Arame para Aplicação em Revestimentos Metálicos. UFSC-2001.

[5] BIDESSE, E. P. Desenvolvimento de Tecnologias no Processo MIG/MAG para aumento de produtividade e melhoria da qualidade mediante o uso da polaridade negativa. UFSC, 2011.

[6] DA SILVA FABIO.Estudo da Viabilidade do Processo de Soldagem FCAW com Adição de Arame Frio, Aplicado a Indústria Naval.UFPADISSERTAÇÃO 2010

[7] LESNEWICH, A. Control of Melting Rate and Metal Transfer in Gas-Shielded Meal-Arc Welding Part I,II – Welding Journal, sept., ago. 1958.

[8] HALMOY EINAR. Wire Melting, Droplet Temperature, and Effective Anode Melting Potential. TWI, London,1979.

[9] PROCESSO MIG/MAG Relatório Disponível no Labsolda.versão 2010.

[10] PROCESSO MIG/MAG 131/135. Universidade de Lisboa. Instituto Superior Técnico. Apostila.

[11] STENBACKA N., PERSON K. Shielding Gases for Gas Metal Arc Welding. Welding Journal. November 1989.

[12] MATSUDA, Fukuhisa. Metal Transfer Characteristics in Pulsed GMA Welding. Welding Research Institute of Osaka University, 1983, Japan

[13] DUTRA, J. C. Contribuição ao estudo da soldagem elètrica a arco voltaico sob atmosferas de argônio e dióxido de carbono. UFSC> Dissertação 1976.

[14] DOBIGNIES, Alex Augusto. Estudo do rendimento de deposição de material na soldagem MIG/MAG em condições de transferência metálica por curto-circuito forçado. UFU-

Curitiba, 2008.

[15] GAS METAL ARC WELDING. Apostila MIG C4.200, Lincoln-Electric. 2006. Disponivel http://www.lincolnelectric.com/assets/en_US/Products/literature/C4200.pdf Acesso em setembro/2011.

[16] QUIMBY B. J. Fume Formation Rates in Gas Metal Arc Welding. WJ Welding Research Suppplement April 1999.

[17] WALLACE MARGIE et al. A Field Evaluation of the Effect of Pulsed Arc Welding Technique on Reducing Worker Exposures. Applied Ocupational and Environmental Hygiene. Vol. 16 (2): 93-97, 2001.

[18] CIRINO, L. M. Estudo dos efeitos da polaridade na soldagem com corrente contínua e alternada pelos processos TIG e MIG/MAG. UFSC: Disertação-2009.

[19] NASCIMENTO, A. S. ; Vilarinho, L. O. Metodologia para Determinação de Parâmetros para Soldagem MIG com Polaridade Variável. Congresso Nacional de Soldagem, 2007, Caxias do Sul - RS. XXXIII CONSOLDA, 2007. p. 1-7.

[20] SCOTTI A. PONOMAREV V. Soldagem MIG/MAG. ArtLiber 2008.

[21] GOHR RAUL Jr. Novos Metodos de Controle da Soldagem MIG/MAG. Tese Posmec-UFSC 2002.

[22] SANTOS, T. F. Soldagem MIG com corrente alternada MIG CA. UFSC-POSMEC. 2008.

[23] GORDON T. et al. Paradigm shift productivity for robotic welding. MIGFast welding tips, 2010.

[24] AMANDEEP S.; SUNIL P. Effect of Auxiliary Preheating of the Filler Wire on Quality of Gas Metal Arc Stailess Steel Cladings. Journal Of Materials Engineering and Performance Vol. 17 Feb. 2008.

[25] EWM-FORCEARC. EWM hightec welding GmbH. Disponivel em http://www.ewm-sales.co.uk/downloads/wm045401_gb_ewm_forcearc-produktinformation_12.pdf Acesso em agosto 2011.

[26] LINCOLN RAPID ARC. Lincoln. Accesso em agosto 2011. Diponivel em http://www.lincolnelectric.com/en-us/industries/Documents/nx280.pdf

[27] OLIVEIRA, Alves Moises. de,. Desenvolvimentos no

processo híbrido Plasma-MIG para operações de soldagem e brasagem. UFSC-2006

[28] RESENDE, André Alves de,. Uma contribuição à analise dos parâmetros de soldagem do processo Plasma-MIG com eletrodos concêntricos. UFU-2009.

[29] GROETELAARS, Peter J. Influência da variação de parâmetros de soldagem sobre a transferência metálica e perfil do cordão no processo MIG/MAG Duplo-Arame. UFU-2005.

[30] AMET INC. XMS-WF COLD WIRE FEEDER PRODUCT SPECIFICATION. http://www.ametinc.com/brochures/AMET_XMS-WF.pdf Acesso em Junho 2011.

[31] Mendez PF, et al. Welding processes for wear resistant overlays. J Manuf Process (2013), http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.06.011

[32] LOUISE DA COSTA. Avaliação das características econômicas do processo de soldagem gmaw com alimentação adicional.SBPC58 2006

[33] LOUISE DA COSTA. Estudo metalurgico e de propriedades mecânicas de soldas gmaw-cw. UFPA Tcc 2007

[34] DIAS ALBERTO. Estudo da viabilidade operacional do processo de soldagem mag com alimentação adicional de arame frio. UFPA dissertação 2007

[35] NETO ABÍLIO. Desenvolvimento de procedimentos de alta eficácia para soldagem de hastes anodicas (tarugos redondos de grande diâmetro).ufsc relatório de bolsa iniciação cientifica 2007

[36] MENDES CASSIO. Sistema de controle de motor cc em malha-fechada para alimentação de arame em máquinas de soldagem. IVCONNEPI 2009

[37] GARCIA DOUGLAS. Estudos das descontinuidades das soldas depositadas pelos processos de soldagem mag e mag-cw. IVCONNEPI 2009

[38] OHASHI FERNANDA. Análises macrográficas de juntas soldadas depositadas pelos processos mag e mag com arame frio. SBPC61 2009

[39] DA SILVA FABIO. Estudo da Viabilidade do Processo de Soldagem FCAW com Adição de Arame Frio, Aplicado a Indústria Naval.UFPA Dissertação 2010

[40] LOBATO ARIANA. Estudo da estabilidade de arco das soldas executadas com o processo de soldagem gmaw-cw. SBPC62 2010

[41] DE CATRO DIOGO. Caracterização geométrica do cordão de solda no processo mig com adição do arame não energizado em diferentes ângulos de ataque. SBPC62 2010

[42] DA SILVA LÚCIO. Estudo da técnica de enchimento de chanfro do aço naval pelo processo gmaw-cw. UFPA dissertação 2011

[43] DOUGLAS GARCÍA. Soldagem Automatizada MIG-CW Aplicada no Revestimento de Chapas de Aço Carbono 1020 com uma Superliga de Níquel Hastelloy C-276.CONSOLDA 2011

[44] DE OLIVEIRA ANDREW. Estudo operacional e econômico de soldas fcaw com e sem adição de arame não energizado.6°COBEF 2011

[45] DOS SANTOS TÁRCIO CABRAL. Desenvolvimento e estudo da viabilidade de um injetor de arame adicional para o processo de soldagem mig/mag e fcaw. 6°COBEF 2011

[46] Video HWGMAW Steel 100Ar Spray Transfer GMAW with Hot-Wire Addition. Universidade de Alberta Canada. June'2012. Pulsed HW current. Disponivel em http://www.youtube.com/watch?v=o3N_r8f8BQk Acesso em dezembro 2012.

[47] MIN H. C. Understanding Bead Hump Formation in Gas Metal Arc Welding Using a Numerical Simulation. Metalurgical and Materials Transactions. Vol 38B, April 2007.

[48] MENDEZ P. , EAGAR T. W. Penetration and Defect Formation in High Currente Arc Welding. Relatôrio do MIT.

[49] NGUYEN T. C. The humping phenomenon during high speed gas metal arc welding. Science and Technology of Welding and Joininig, 2005 vol 10 No. 4.

[50] SOLDERSTORM, E., Mendez, P. Humping Mechanism Present in High Speed Welding. Science and Tecnology of Welding and Joining, vol 11 No 5. 2006.

[51] XUESONG L. ET AL. The characteristic of twin-electrode TIG coupling arc pressure, JOURNAL OF PHYSICS D: APPLIED PHYSICS: 39 (2006)

[52] DRUMMOND, Harris. High-Speed GMAW and Laser GMAW Hybrid Welding of Steel Sheet. Cranfield

University, 2009.

[53] REDDING C. J. Fume Model for Gas Metal Arc Welding. Welding Journal June 2002.

[54] PIRES I. et al. Analysis of the influence of shielding gas mixtures on the gas metal arc welding metal transfer modes and fume formation rate. Materials and Design 28, 2007.

[55] KANG Y. H.; NA S. J. Characterictics of Welding and Arc Signal in Narrow Groove Gas Metal Arc Welding Using Electromagnetic Arc Oscilation. Welding Journal May 2003

[56] MICHELAN F., Prospecção de Novas Possibilidades de Soldagem com Duplo Eletrodo não Consumível. 2011.

[57] MACHADO G. I. Soldagem & Tecnicas Conexas: Processos. Editado pelo autor, 1996.

[58] UEYAMA T. et al. Solution to problems of arc interuption and stable arc lenth control in tandem pulsed GMA welding-study of arc stability in tandem pulsed GMA welding (Report 2) Welding International, 2006, 20 (8), pp 602-611

[59] REIS, R., SCOTTI A.. Considerations on arc interruptions in pulsed GMAW. 19o POSMEC;Simpósio do Programa de Pós Graduação, Universidade Federal de Uberlândia. 2009.

[60] NOMURA et al. MAGNETIC FORCE IN MULTI-ELECTRODESUBMENGER-ARC WELDING. The welding Institute, Arc phisics and weld pool behaviour. London-1979.

[61] REIS, RUHAM PABLO. Assesment of Low Current Tandem GMAW Processes with WaveformControl and with Aid of Laser Beam. Tese Universidade Federal de Uberlândia, 2009.

[62] FORTAIN et al. Innovative process improves welding of sheet metal parts. Welding Journal jan-2008.

[63] DA CUNHA TIAGO VIEIRA. Desenvolvimento de um sistema adaptativo de alimentação de arame para o processo TIG. Relatorio 2007.

[64] RIBEIRO J. C. Análise de Técnicas para a Soldagem TIG Automatizada. Dissertação-UFSC Florianópolis, SC, 2012.

[65] KOPECKY et al. WITH THE NARROW GAP TIG HOT WIRE WELDING MULTIPLY YOUR PRODUCTIVITY BY A FACTOR OF 9, WITHOUT SACRIFYING THE QUALITY. Polysude. Nantes-France 2003.

[66] Sistema de Aquisição Portátil. Disponivel em

http://www.imc-soldagem.com.br/ Acesso em nov. 2013.

[67] Camera Infravermelha FLIR Thermacam 500. Disponivel em http://www.photonicsonline.com/doc.mvc/FLIR-Introduces-Thermacam-SC-500-Low-Cost-The-0001 Acesso em junho 2013.

[68] TUBAL C. Hardening Tempering and Heat Treatment, Special Interest model Books, Poole/UK- 2002.

[69] GERLING H. Modelo y conformación, título original "Über Fertingungsverfahren Urformen Umformen", Editorial Reverté, S.A. 1979, Barcelona-España.

[70] VENKATESH K. High-Temperature Properties of steel for fire resistance modeling structures. Journal of materials in civil engineering ACE, maio-2010.

[71] HORMANDO L, PASSOS J. C., et al. Heat transfer behavior of high temperature steel plate cooled by a subcooled impinging circular water Jet. 7th ECI International conference on boiling heat transfer. Florianopolis SC, May 2009.

[72] FOTOGRAMA. Disponivel em Wikipedia http://es.wikipedia.org/wiki/Fotograma. Acesso em 11/2012.

[73] LANCASTER J.F., The physics of fusion welding Part 1: The electric arc in welding , IEE PROCEEDINGS, Vol. 134, Pt.B, No. 5, SEPTEMBER 1987

[74] LANCASTER J.F., The physics of fusion welding Part 2: Mass transfer and heat flow, IEE PROCEEDINGS, Vol. 134, Pt. B, No. 6, NOVEMBER 1987

[75] LV S. X. et al. Arc heating hot wire assisted arc welding technique for low resistance welding wire. Science and Technology of Welding and Joining 2007 VOL 12 NO 5