

# Fundamentos Científicos e Tecnológicos para o Desenvolvimento do Processo MIG/MAG por Curto-Circuito Controlado (CCC) – Uma Revisão da Literatura. Parte 2 de 3: Formação da Gota Metálica, Gases de Proteção, Mecanismos de Penetração, Aporte Térmico e Aspectos Econômicos

(Scientific and Technological Fundamentals for the Development of the Controlled Short Circuiting MIG/MAG Welding Process (CCC) – A Literature Review. Part 2 of 3: Metal Droplet Formation, Shield Gases, Penetration Mechanisms, Heat Input and Economical Aspects)

Régis Henrique Gonçalves e Silva<sup>1</sup>, Jair Carlos Dutra<sup>1</sup>, Raul Gohr Jr.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Soldagem, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, regis@labsolda.ufsc.br

## Resumo

A segunda parte desta série aborda os modos de transferência metálica de mais interesse no processo MIG/MAG, quando do desenvolvimento do processo CCC. De importância primeira, então, se considera a transferência por arco pulsado e a transferência por curto-circuito, cuja fusão constitui o fundamento de funcionamento do CCC. Ainda em relação à dinâmica da transferência, revisou-se os mecanismos de formação da gota metálica e as forças atuantes sobre a mesma. Para um entendimento mais completo, também são descritos os aspectos relativos aos gases de proteção mais comumente utilizados no processo MIG/MAG, enfatizando as aplicações mais rotineiras, inclusive relacionando-se aspectos econômicos relevantes. Consistindo em importantes características das soldas realizadas, são apresentadas, também, informações concernentes à penetração e aporte térmico na soldagem MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito.

**Palavras-chave:** Soldagem MIG/MAG, CCC, Curto-circuito Controlado, Penetração, Aporte Térmico, Gases de Proteção

**Abstract:** The second part of this series deals with the metal transfer modes of most interest to the MIG/MAG process, regarding the development of the CCC. Of major importance are the pulsed arc and short-circuiting arc welding, both of which are the basis for the CCC. Also relating to the metal transfer dynamics, the drop formation and the forces acting on it are revised. For a more complete understanding, aspects regarding shielding gases are described, including economic issues. Being important characteristics of any weld, information concerning short-circuiting MIG/MAG welding penetration and heat input are also provided.

**Key-words:** MIG/MAG Welding, CCC, Controlled Short-circuiting, Penetration, Heat Input, Shield Gases

## 1. Modos de transferência metálica – Curto-circuito e Corrente Pulsada

Uma das mais relevantes características de processos de soldagem a arco nos quais há adição de material é a forma em que se dá a transferência desse material para a peça a ser soldada. O modo de transferência influi grandemente na eficiência de deposição, na qualidade estética e estrutural da junta realizada, na geometria da solda, nas formas pelas quais cada operação pode ser realizada, no aporte térmico ao material de base, entre outros aspectos relacionados. Como consequência, o modo de transferência determina, junto a outras variáveis e parâmetros de soldagem, os custos e a produtividade alcançada nas operações produtivas adotadas

nas empresas.

O processo MIG/MAG utiliza eletrodo consumível e o modo de transferência do mesmo para a peça é determinado por uma conjunção de fatores. Considerando-se a importância acima citada do modo de transferência para o resultado da solda e a influência dos fatores determinantes, o controle dessa característica é objeto de estudos em várias linhas de pesquisa do LABSOLDA, como a soldagem pulsada e o tema deste trabalho, o CCC. Neste sentido, enfatizam-se abaixo os modos de transferência por corrente pulsada e por curto-circuito convencional, cujas bases constituem também os fundamentos do CCC.

O modo de transferência conhecido como globular, por ser citado na literatura como indesejável e a ser evitado na produção, será desconsiderado neste trabalho. Razão para isso é a instabilidade generalizada observada nesta situação [1,2,3,4].

---

(Recebido em 07/04/2006; Texto Final em 05/05/2007).

## 2. Formação da Gota Metálica

Sendo a razão de uma das fases existentes na forma de onda da maioria dos sistemas de transferência metálica por curto-circuito com controle de corrente estudados e também do aqui desenvolvido, o mecanismo de formação da gota metálica deve ser entendido, para que seu dimensionamento seja adequado.

O arame, como mencionado anteriormente, é aquecido ao longo de sua extensão por efeito Joule, não bastando essa componente para fundi-lo. Assim, um volume unitário de arame chega à frente de fusão (Figura 1) previamente aquecido, onde recebe uma quantidade adicional de energia, proveniente do arco, somando-se o total necessário para a fusão do material [5]. O líquido formado, sob a atuação da tensão superficial, tende a se tornar uma esfera, a gota metálica [6].

No caso abordado, o arco, definido anteriormente como de coluna altamente constricta, não incide diretamente na frente de fusão, mas na superfície inferior das gotas que se formam sucessivamente. Portanto, o calor gerado na interface arco/gota (menos a energia de evaporação  $Q_{ev}$ ) é transmitido indiretamente para o metal sólido da frente de fusão. Em relação à transferência metálica por curto-circuito, essa transmissão é realizada por convecção.

O perfil geométrico de distribuição do fluxo de corrente através da gota impõe um perfil de velocidades no líquido que compõe a mesma, no qual o material da região central do interior da gota, é impelido em direção ao arco no eixo do arame, enquanto o líquido que se encontra na interface arco/gota é impelido para a frente de fusão, fluindo pela superfície da gota (Figura 1).

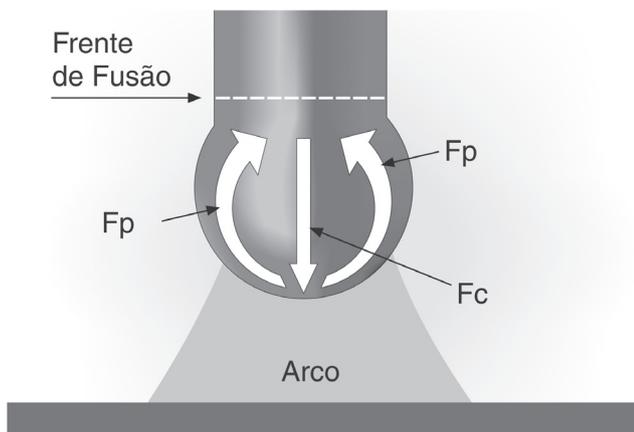


Figura 1 - Transferência de calor da interface arco/gota ( $H_a - Q_{ev}$ ) para a frente de fusão: convecção. Perfil do fluxo de material: Fp: fluxo na periferia, Fc: fluxo central.

O calor absorvido na interface é, então, entregue ao arame sólido previamente aquecido. Certa quantidade de calor é transferida por condução para a extensão de arame sólido anterior à frente de fusão, mas tanto a quantidade,

quanto a extensão atingida por essa porção podem ser desprezados [5].

Em processos onde se objetiva um melhor controle da transferência metálica, a forma de fornecimento de energia para o arame exerce grande influência. Exemplos são o MIG/MAG em corrente pulsada e o objeto desta pesquisa, o CCC. Em todos eles, projetam-se as formas de onda de energia para que se obtenha um dimensionamento adequado das gotas transferidas [2,3]. Naturalmente, em condições reais, esse volume varia, pois há vaporização metálica, a configuração da solda se modifica e ocorrem outras perturbações, assim como a gota também não é perfeitamente esférica. Isto, porém, não proíbe que resultados satisfatórios sejam alcançados, mostrando a robustez dos processos quando, naturalmente, os procedimentos são bem desenhados.

No processo MIG/MAG em corrente pulsada, em baixas correntes médias e com uma gota por pulso, a dimensão da gota a ser transferida é, predominantemente, determinada pelas características do pulso, exercendo a fase de base apenas a função de manter o arco elétrico e o aquecimento da poça metálica [2,3]. Ressalva-se, porém, que há, apesar de em escala bem inferior, fusão também na fase de base.

A expressão

$$V_f = C \times I_p^2 \times t_p \quad (3)$$

foi estabelecida e é normalmente utilizada para o dimensionamento da gota no processo MIG/MAG em corrente pulsada, onde  $V_f$  é o volume da gota,  $I_p$  é a corrente de pulso e  $t_p$  é o tempo em que ela é imposta. Baixo [7], em seu trabalho, verificou a validade de uma expressão como essa também para o caso da transferência metálica por curto-circuito convencional (controle de tensão) e com controle de corrente (Figura 2 e Figura 3, respectivamente), numa relação linear entre  $V_f$  e a energia entregue no tempo de arco, no qual a gota é formada, quantificada pela integral da corrente pelo tempo na fase de arco.

Ressalta-se que a indutância do circuito de soldagem e as características dinâmicas da fonte de soldagem devem ser cuidadosamente observadas, pois delas depende a real quantidade de energia que surge quando se estabelecem as variáveis pela expressão (3) [8,9]. Este fato deve ser levado em consideração principalmente em problemas como o tratado neste trabalho. Dada a agressividade usual do ambiente petrolífero, costuma-se posicionar os equipamentos em lugares protegidos, que podem ser afastados da solda a ser realizada, aumentando a indutância do circuito pela extensão dos cabos. Baixo [10] determinou que, caso a indutância do circuito se mantenha na faixa de 60  $\mu\text{H}$  a 80  $\mu\text{H}$ , é possível que o CCC seja empregado, mesmo com extensão de cabos entre 50 m e 100 m.

Em se tratando do processo MIG/MAG com arame-eletrodo negativo ou em transferência por projeção goticular axial, os mecanismos de aquecimento e formação da gota envolvidos se diferem [5,11,12]. Esses casos, entretanto, não serão abordados nesta série de artigos.

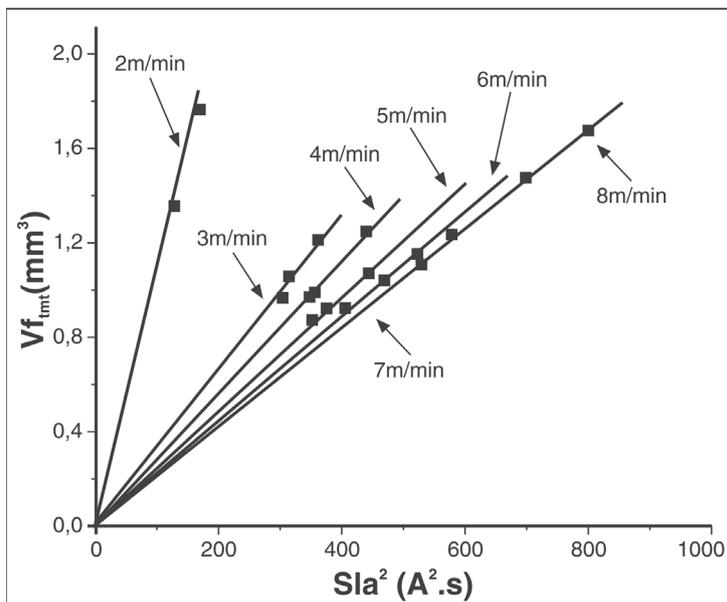


Figura 2 -Relação entre o volume da gota fundida  $\{Vf_{tmt}\}$  e o valor da integral da corrente na fase de arco  $[Ia^2(t).dt]_m$ , representado no gráfico por  $(SIa^2)$ . [7]

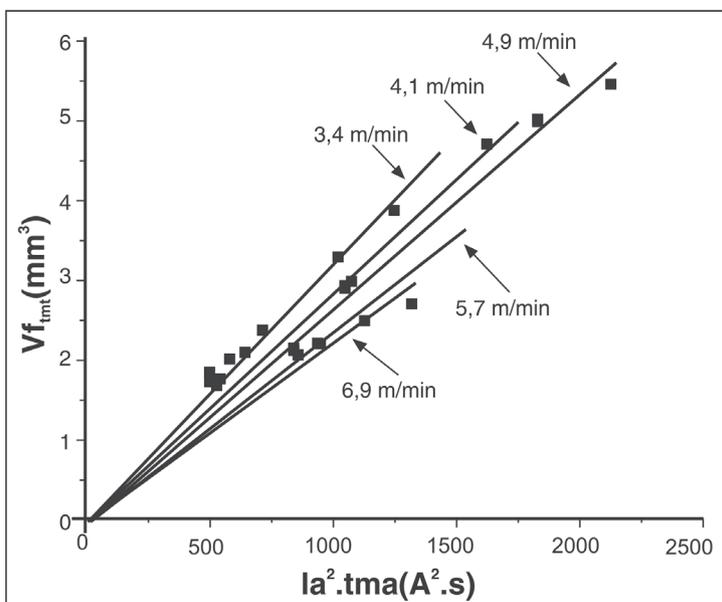


Figura 3 - Relação entre o volume da gota fundida  $\{Vf_{tmt}\}$  e o valor da integral da corrente na fase de arco  $[Ia^2.tma]_m$ . [7]

### 3. Forças Envolvidas na Transferência Metálica

Ao longo de sua formação, e de acordo com a configuração da solda, o metal líquido a ser transferido do arame-eletrodo à peça está submetido a forças, assim como também o está a poça de fusão. Tais forças têm considerável influência no resultado, contribuindo na determinação do modo e dinâmica da transferência metálica

e das características da solda, como a penetração. Desta maneira, o entendimento dessas forças é de interesse para o desenvolvimento de um método distinto de soldagem, como o é o CCC, pois as forças e sua influência também podem ser distintas em relação aos processos usuais, já profundamente estudados.

Como a própria designação afirma, o arame-eletrodo do processo MIG/MAG conduz corrente elétrica e, assim, está

submetido, ao longo da extensão sólida do eletrodo, à força eletromagnética que surge em decorrência deste fluxo. Todavia, é a porção líquida, portanto deformável, a partir da frente de fusão, que sente e responde à atuação desta e das outras forças.

Um condutor de corrente, como por exemplo o arame-eletrodo, a gota metálica formada e o próprio arco voltaico, pode ser visto como vários pequenos condutores (na realidade linhas de campo percorridas por portadores de carga) e o fluxo de partículas de carga ao longo dos mesmos pode ser comparado a uma corrente elétrica. Em assim sendo, surge uma força sobre as cargas, direcionada para o centro do macro-condutor, decorrente da interação entre os campos elétricos, chamada Força de Lorentz, dada por:

$$FL=q \times V \times B \times \text{sen}\theta \quad (4),$$

onde q é a carga elétrica do portador, V o vetor velocidade da carga, B, o vetor campo magnético e  $\theta$  o ângulo entre ambos.

Quando há variação na seção circular do macro-condutor, como a que ocorre entre a frente de fusão e a interface arco-gota, esta força é dotada de uma componente axial, a qual é determinante em relação à transferência metálica (Figura 4).

A componente radial desta força, sempre direcionada para o centro do condutor, é conhecida como Efeito Pinch igualmente importante no transcurso da transferência metálica no processo MIG/MAG [13]. A componente axial da Força de Lorentz pode atuar a favor ou contra o destacamento da gota, mas sempre no sentido de aumento da área do condutor (Figura 4), enquanto o Efeito Pinch é responsável pela constrição da ponte metálica líquida adjacente ao eletrodo sólido, normalmente favorecendo o

destacamento.

Dadas a equação (4) e a Figura 4, a atuação força de Lorentz depende da corrente elétrica e das características geométricas de seu fluxo [14]. Essa dependência é corroborada por Stava [15], no trabalho em que abordou a transferência metálica por curto-circuito. pela expressão:

$$G=I^2 \times (R^2-r^2)/(100 \times \pi \times R^4) \quad (5),$$

a qual mostra, ainda, que a intensidade do Efeito Pinch () é proporcional ao quadrado da corrente e tanto maior, quanto menor o raio do condutor, para a mesma corrente. Ou seja, a densidade de corrente também é fator determinante. Nesta expressão,  $r$  é o raio do arame-eletrodo e  $R$  é o raio da ponte líquida (portanto variável) [15,16]. Uma outra expressão para a intensidade do Efeito Pinch () é dada por Slania [13]:

$$f=10 \times 2 \times m \times I^2/4 \times \pi^2 \times a^2 \quad (6),$$

onde  $\mu$  é a permeabilidade magnética do material,  $a$  é o raio da área deformada e  $I$  a corrente.

A força de Lorentz também aparece quando se trata dos raios anódicos e catódicos, os quais concentram a corrente elétrica momentaneamente em pontos específicos do eletrodo, podendo atuar no sentido de reter a transferência da gota metálica [7,17].

Outra força citada pela literatura é a força de arraste do jato plasma, causada pela diferença de pressão entre a região da interface arco/gota e a região da interface arco/peça. Há controvérsias em relação à contribuição desta força na transferência metálica, que se tornaria importante nos modos de transferência em vôo livre, ou seja, sem que haja curto-circuito [13,17]. Também, alguns autores creditam

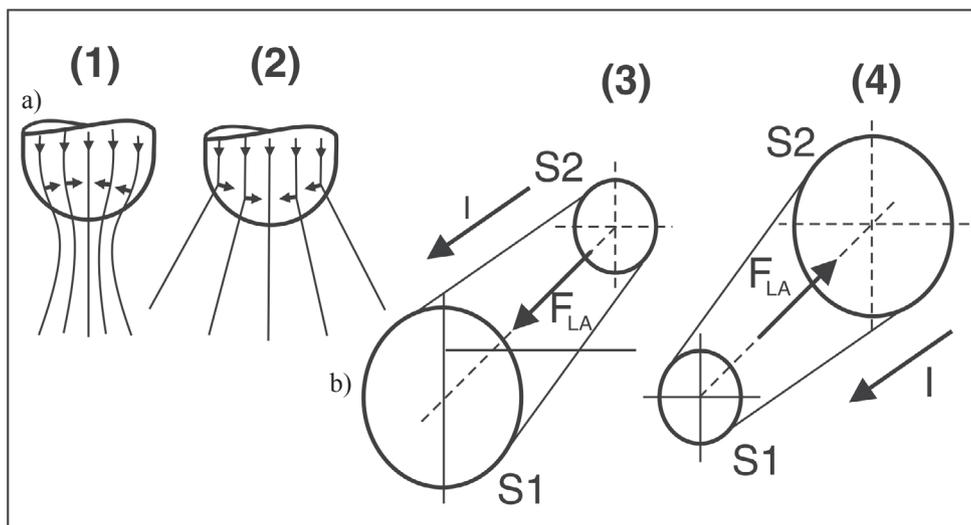


Figura 4 - Atuação da Força de Lorentz, originada pelos campos eletromagnéticos na soldagem MIG/MAG: a) desmembramento da força em componente axial e longitudinal; b) atuação da componente longitudinal ( $F_{LA}$ ). a)1 e b)4 são correspondentes, caracterizando uma  $F_{LA}$  contrária ao destacamento da gota. Já a)2 e b)3 caracterizam uma resultante  $F_{LA}$  a favor do destacamento. [7]

à influência desta força sobre as gotas a forma tomada pela penetração da solda, mas isso é contestado por outros [18]. Por outro lado, a contribuição direta do jato plasma na redução da espessura da poça de fusão, e conseqüente variação da penetração neste modo transferência é citada na literatura [15], e, de acordo com resultados encontrados no LABSOLDA, há motivos para que isto seja investigado.

A força da Tensão Superficial tem incontestável importância ao longo de todo o processo de transferência, seja qual for o modo. Na coexistência de dois meios diferentes, a região de contato entre ambos é caracterizada por uma camada de átomos que estão submetidos a uma força direcionada ao interior do volume a que pertencem. Esta força atua no sentido de reduzir ao mínimo a energia superficial livre, o que no caso de líquidos, os leva a assumir a forma esférica, que é a de menor área superficial para um determinado volume [19]. No caso da soldagem MIG/MAG, a força da tensão superficial tende a reter a gota metálica ao eletrodo [13] dando a ela a forma esférica, e, quando há curto-circuito entre o arame-eletrodo e a peça através da gota metálica, esta é puxada pela tensão superficial da poça metálica para si, fato que dá origem ao nome comercial adotado pela empresa Lincoln para seu processo similar ao CCC, o chamado STT (, ou transferência por tensão superficial) [15,20]. A intensidade desta força e sua taxa de variação com a temperatura dependem da temperatura do material e de sua composição química [7,11].

Existem gradientes de temperatura na superfície da gota metálica, assim como a composição química na mesma também não é homogênea, causando variações na tensão superficial. Todavia, estes fatores são desconsiderados no estudo da soldagem devido à sua complexidade e baixa relevância prática.

Em relação à força peso, apesar de estar sempre presente, sua contribuição é tida como irrelevante, principalmente para o caso da transferência metálica por curto-circuito, em relação às outras forças atuantes [14].

Cada uma das forças descritas atua no sentido de favorecer ou dificultar (determinantemente ou não) a transferência da gota formada da extremidade do arame-eletrodo para a peça. A teoria mais aceita para a determinação do modo de transferência considera um balanço destas forças atuando no sistema. De um modo geral, quando a soma das forças favoráveis ao destacamento sobrepuja aquelas contrárias ao mesmo, a gota é destacada e impelida em direção à peça. Considerando o exposto acima, este balanço é, de forma geral, assim equacionado:

$$F_{ts} = F_{LA} + F_{arr} + F_p \quad (7),$$

onde  $F_{ts}$  é a força da tensão superficial,  $F_{LA}$  a componente axial da força de Lorentz,  $F_{arr}$  é a força de arraste e  $F_p$  a força peso. Nota-se que não está considerado o efeito dos jatos catódicos e anódicos. Esta relação determina, de fato, um ponto de operação no qual a transferência metálica se dá sem curto-circuito, na chamada transferência em vôo livre. Este ponto é determinado pela corrente de soldagem, a

qual é conhecida por corrente de transição. Há, ainda, uma segunda teoria, chamada de Instabilidade Pinch, para o momento de transição [7,17]. A mais aceita, no entanto, é a primeira.

Em relação à transferência metálica por curto-circuito convencional e CCC, a questão das forças será mais profundamente abordada a seguir.

#### 4. Função do Gás de Proteção

Essencialmente, os gases utilizados na soldagem MIG/MAG têm como função a proteção (daí o nome) do material fundido contra elementos da atmosfera que possam comprometer a integridade da solda efetuada. Eles formam uma barreira física contra o acesso de, principalmente, oxigênio, nitrogênio e hidrogênio, reduzindo a susceptibilidade à formação de poros, excesso de óxidos, nitretos, inclusões e trincas a frio, todos prejudiciais a resistência da junta soldada [21,22]. Para que isso seja conseguido, o fluxo de gás de proteção na ponta da tocha deve ser adequado, evitando o escoamento turbulento, e não deve haver orifícios que permitam entrada de ar no fluxo. Ambos permitiriam a chegada de ar atmosférico na poça. Na realidade, a importância dos gases utilizados na soldagem MIG/MAG se estende à própria viabilidade de realização do processo, pois deles depende a própria subsistência do arco elétrico de maneira coerente. Ao serem aquecidos e submetidos à tensão entre os eletrodos, os gases se dissociam liberando íons, necessários à formação do plasma e condução da corrente. São enfatizados, neste texto, misturas de Argônio (Ar) e Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) e o CO<sub>2</sub> puro, que são os gases mais aplicados em problemas como o aqui atacado.

Outra função importante assumida pelos gases na soldagem MIG/MAG de aços diz respeito à estabilidade do arco (cujo conceito será mais bem abordado a seguir). Gases oxidantes são adicionados para que se forme uma película óxida sobre a poça fundida, propiciando a chamada estabilização dos pontos catódicos [1,7,21]. Caso contrário, o arco é alimentado de elétrons advindos das bordas da poça aleatoriamente, o que está relacionado à queda de estabilidade do arco. Este fato é identificado pelo aparecimento de ataque eletroquímico nesta região [7].

#### 5. Efeitos do Gás de Proteção

Muitas vezes citados como funções dos gases, os efeitos que os mesmos causam no processo não são assim considerados, pois as características do processo e do resultado vão depender não apenas da composição dos gases, mas de toda a configuração do procedimento, incluindo vários outros parâmetros de soldagem.

Para exemplificar o exposto, cita-se o efeito do gás CO<sub>2</sub> de restringir o arco e, conseqüentemente, causar uma redução de área da interface arco-gota, em comparação com outra mistura mais pobre em CO<sub>2</sub>, em regulagens de processo semelhantes. Este comportamento se deve a maior

condutividade térmica do CO<sub>2</sub>, e tende a originar uma força na gota em sentido contrário ao seu destacamento, o que, por sua vez, tende a levar o processo ao modo de transferência por curto-circuito [1,7,11]. No entanto, não se pode afirmar que é função do CO<sub>2</sub> definir o modo de transferência de determinada solda, pois isso dependerá, principalmente, da variável corrente. Esta força é a razão pela qual também há maior tendência a respingos, conforme o aumento de CO<sub>2</sub> no gás (Figura 5) [23,24,25].

Em se tratando de respingos, existe também o efeito explosivo causado por gases ricos em CO<sub>2</sub>, advindo da formação de gases de oxidação e sua expansão repentina. Este fato contribui para a afirmação de que gases ricos em CO<sub>2</sub> produzem, em geral, pior acabamento da solda e necessidade de limpeza adicional da mesma e, devido à adesão de respingos ao bocal, maior tempo de limpeza deste e maior possibilidade de contaminação da poça, por perturbação no fluxo de gás [7,11,22,26].

Outro efeito importante do CO<sub>2</sub>, no caso do CCC (imposição de corrente), é o aumento da potência gerada no processo, em comparação com gases mais pobres em CO<sub>2</sub>, reiterando-se que em regulagem semelhante de corrente. Uma mesma corrente impõe tensões maiores para misturas com mais CO<sub>2</sub>. Isto se traduz em maior fluidez na poça, e conseqüente maior molhabilidade [11,21,25]. Esta informação é importante quando da determinação da forma de onda do CCC para diversas misturas. A literatura [27] cita, também, que maior quantidade de CO<sub>2</sub> gera mais oxidação do Silício contido nos materiais e esta reação gera

calor, contribuindo para o aumento da temperatura e fluidez do metal fundido.

É sabido que a transferência metálica por curto-circuito, geralmente obtida com misturas ricas em CO<sub>2</sub>, fornece soldas com menos hidrogênio difusível, que tende a gerar trincas (Tabela 1). Vaidya [1] sugere como explicação para isso uma menor relação área superficial/volume obtida nas maiores gotas deste modo. Por outro lado, redução no nível de CO<sub>2</sub> tende a resultar em menos oxigênio no metal de solda, aumentando a tenacidade, devido à redução no nível e tamanho de inclusões óxidas [11].

A literatura também cita como função do gás de proteção a determinação do perfil e profundidade de penetração. Vaidya [1] afirma que isto advém de uma tendência das misturas com alta porcentagem de Ar em relação ao CO<sub>2</sub>, de causar transferência por escoamento goticular axial, o que causaria maior eficiência de fusão no centro do cordão de solda e o chamado (penetração em forma de dedo, Figura 6), enquanto crescentes porcentagens de CO<sub>2</sub> levariam a uma transferência por curto-circuito, modificando o perfil transversal do metal de solda.

Outros autores afirmam que esta tendência ao para misturas mais ricas em Ar advém da maior concentração de calor na região central do arco, ou ainda, pela possível maior força de arraste sobre as gotas [7,28]. O fato é que existe, ainda, controvérsia em relação aos mecanismos de penetração atuantes no processo MIG/MAG, as quais serão abordadas a seguir. Realmente existe uma tendência ao para misturas mais ricas em Ar, como verificado em

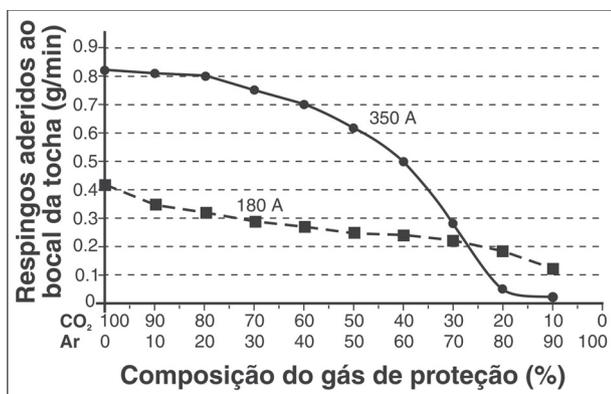


Figura 5 - Redução do nível de respingos com a redução do teor de CO<sub>2</sub> no gás de proteção. [24]

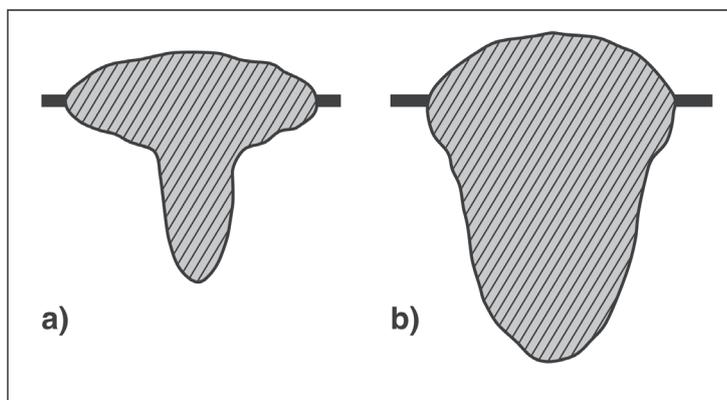


Figura 6 - Perfis de penetração típicos (e didáticos) de misturas de Ar e CO<sub>2</sub> a) baixa porcentagem de CO<sub>2</sub> e b) alta porcentagem de CO<sub>2</sub>

Tabela 1 - Quantidade de hidrogênio difusível no metal de solda, de acordo com o gás de proteção e seu potencial de oxidação.[1]

Gás de Proteção	Potencial de Oxidação	Hidrogênio difusível (ml/100 g)
Ar + 5 % CO <sub>2</sub>	2,5	1,51
Ar + 15 % CO <sub>2</sub>	7,5	Não disponível
Ar + 20 % CO <sub>2</sub>	10	1,29
100 % CO <sub>2</sub>	50	0,85

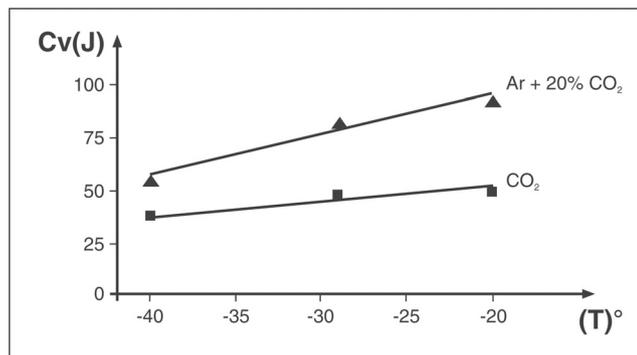


Figura 7 - Tenacidade de soldas com dois diferentes gases de proteção, mesmo arame e condições de soldagem similares. [11]

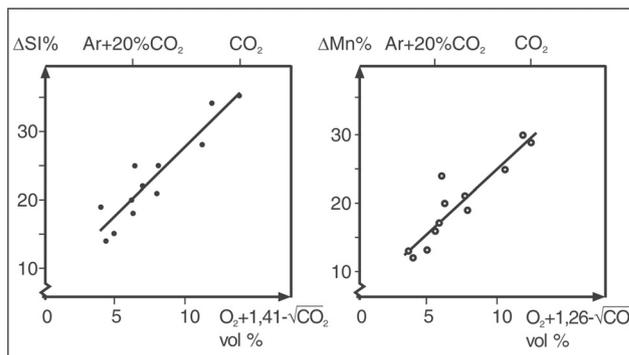


Figura 8 - Perda de a) Silício e b) Manganês por oxidação, como porcentagem do teor original do elemento no arame (a) 0,85%; b) 1,42%, de acordo com o potencial de oxidação do gás (segundo esta fonte, dado por  $\{ \% O_2 + 1,41 * (\% CO_2)^{1/2} \}$  para o Si e  $\{ \% O_2 + 1,26 * (\% CO_2)^{1/2} \}$  para o Mn).[11]

experiências no LABSOLDA, mas não se pode afirmar que sua determinação seja função do gás de proteção. Primeiramente, porque é um perfil indesejável para a solda, ou seja, não se escolheria uma mistura gasosa para determinada solda com a função de causar . E em segundo lugar, porque a determinação do modo de transferência (considerando que este determina o perfil transversal da solda), como já mencionado, depende, principalmente, da corrente, tendo o gás apenas influência no resultado.

Em relação à taxa de fusão, a composição do gás não exerce influência direta. Embora, ao se avaliar diferentes misturas, se tenha certa liberdade para alterar a velocidade de alimentação de arame, esse fato é devido aos efeitos que o gás pode ter sobre o processo, e não diretamente por sua composição [29,30].

Existe a questão do potencial de oxidação, cujo cálculo para determinação é sugerido por alguns autores, em diferentes versões [1,11]. O conceito de potencial de oxidação não está, ainda, estritamente definido, em geral é tido como o modo pelo qual a quantidade de oxigênio no metal de solda resultante é afetada pelo gás de proteção. A redução no nível de CO<sub>2</sub> do gás de proteção reduz seu potencial de oxidação, resultando, de uma maneira geral,

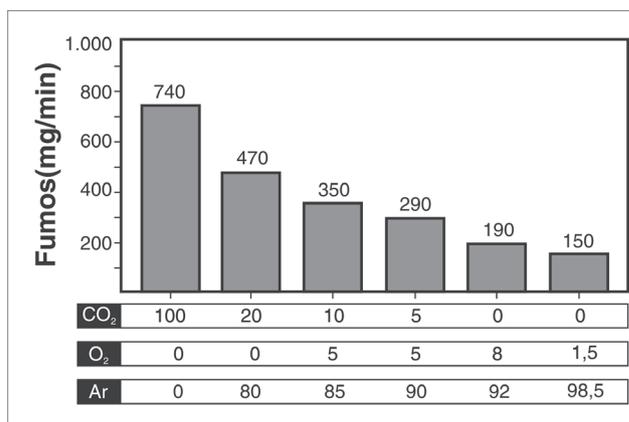


Figura 9 - Efeito da composição do gás de proteção sobre a taxa de geração de fumos, para situações similares de soldagem. Eixo x em %.[1]

em soldas com mais tenacidade (Figura 7), menos escória, e menores perdas de elementos de liga por oxidação (Figura 8 e Tabela 2) [1,11]. Menor nível de emissão de fumos também é uma consequência (Figura 9), reduzindo a insalubridade do ambiente para o soldador [1].

Tabela 2 - Perda de elementos de liga (Si e Mn) por oxidação, em relação à composição original do arame. [1]

Arame	1,25 % Mn	0,73 % Si
Gás de Proteção	Perda de elementos de liga por oxidação (%)	
Ar + 10 % CO <sub>2</sub>	0,98 % Mn	0,57 % Si
Ar + 18 % CO <sub>2</sub>	0,93 % Mn	0,5 % Si
Ar + 35 % CO <sub>2</sub>	0,89 % Mn	0,42 % Si

## 6. Fatores Econômicos

Dado o crescimento do setor de Petróleo e Gás e o alto volume de recursos gerados e despendidos, a competitividade das empresas do ramo se torna crucial para sua sobrevivência. Sendo assim, aumento de produtividade e redução de custos deve fazer parte da estratégia de ação dessas empresas. Ressalta-se que isso deve ser buscado de maneira racional, observando todos os aspectos relevantes. Incluem-se, aí, as operações de soldagem na construção das linhas dutoviárias petrolíferas, as quais exigem considerável quantidade de investimento.

De uma maneira geral, soldas realizadas com misturas ricas em Ar, com pouco CO<sub>2</sub>, têm maior chance de apresentar resultados satisfatórios quando há um caráter mais crítico em termos de requisitos de regularidade na transferência metálica e geração de respingos, como em passes de raiz, chapas finas e peças onde a estética é um critério de avaliação, seja pela possibilidade de se utilizar corrente pulsada, seja pelo caráter errático e explosivo da transferência metálica característico do CO<sub>2</sub>. Por outro lado, o CO<sub>2</sub> é, tradicionalmente, visto como o gás de menor custo, e, assim, pode surgir uma barreira à adoção de misturas com Ar. Esta comparação de custos deve ser muito criteriosa, pois os ganhos em produtividade obtidos com misturas tendem a sobrepujar o fato de estas serem mais caras (se isso realmente ocorrer). Ou seja, o próprio preço dos gases deve ser realmente analisado, pois se sabe que varia de acordo com a disponibilidade, logística necessária, região, etc...[21,23,24,31].

O fato mais relevante, porém, é que o gás de proteção representa uma fatia pequena dos custos da soldagem MIG/MAG, como mostra a Figura 10. Este cenário é confirmado por várias fontes [21,24,27], mostrando que investimentos em misturas mais eficientes (mesmo que mais caras), que resultarem em aumento da produtividade da mão de obra, têm impacto significativo no custo geral da produção.

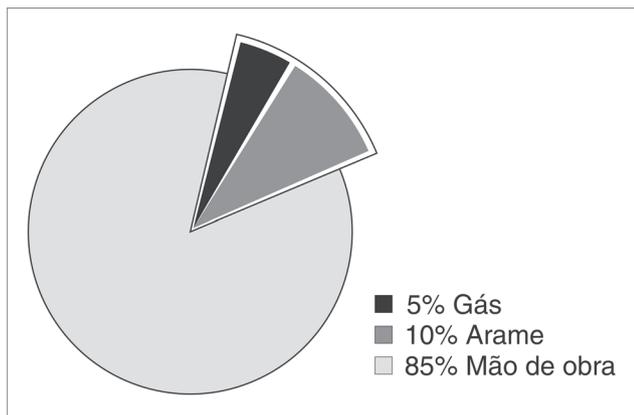


Figura 10 - Custo geral típico da solda no processo produtivo, para aço comum. [21,24,27].

## 7. Mecanismos de Penetração e Aporte Térmico

A importância do entendimento dos mecanismos de penetração na soldagem MIG/MAG se dá tendo em vista que o seu controle constitui uma função atribuída à forma de onda de sistemas similares ao aqui desenvolvido. O controle do aporte térmico também é função da forma de onda e, ao determinar importantes características da solda, como metalúrgicas e geométricas, também merece ter seus aspectos investigados.

### 7.1. Penetração

Apesar do considerável volume de material pesquisado, muito pouca informação está disponível sobre os mecanismos de penetração na soldagem MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito. A maioria dos autores aborda a transferência em vôo livre. Já as fontes de informação sobre os sistemas MIG/MAG TMCCC (MIG/MAG em transferência metálica por curto circuito com controle de corrente) apresentam informações vagas e contraditórias em relação à atuação dos mecanismos de penetração presentes, o que será comentado adiante, no item dedicado a estes sistemas. No entanto, todos foram considerados, a fim de, em conjunto com os resultados dos ensaios, se levantarem hipóteses mais fundamentadas sobre a penetração no CCC.

No caso da transferência em escoamento goticular axial ( $\alpha$ ), as teorias mais citadas consideram a variável corrente de soldagem como a mais importante para determinação da penetração [32]. A questão é: a corrente influencia diretamente essa característica da solda? Pesquisas que investigavam esta questão, nas quais apenas a corrente foi a variável alterada, verificaram que, por si só, grandes variações neste valor não acarretam variações significativas na penetração [18,32,33]. É importante ressaltar que nestes testes não havia transferência metálica, apenas fusão do metal de base. Há, na literatura, trabalhos que afirmam o contrário, creditando maiores penetrações à maior intensidade da força de arraste do plasma [35] ou à modificação do perfil de convecção e aparecimento de um vortex na poça [7,18,34], decorrendo, sim, do aumento da corrente. Os resultados do presente trabalho tendem a considerar a teoria do vortex como válida para a transferência metálica por curto-circuito.

A primeira linha de pensamento citada deduz que a penetração obtida é decorrente da frequência de impacto das gotas sobre a poça. Ao se reduzir o espaço de tempo entre o impacto de uma gota e da seguinte, há menos tempo para a cavidade causada na poça pela primeira gota se recuperar, até o impacto da gota posterior. Com isto, há maior eficiência na transferência do calor contido na gota, superaquecida, para o metal de base, aumentando a penetração [5]. Segundo esta teoria, a energia cinética desenvolvida pela gota metálica ao longo do arco não é relevante perante as outras formas de energia envolvidas [32,33], o que é contestado em outros trabalhos. Na

transferência por curto-circuito este fator não se inclui, pois a gota não é impelida em vôo livre até impactar contra a peça e, portanto, não será mais profundamente analisado. Na transferência por curto-circuito convencional se relaciona a penetração com a distância bico-de-contato/peça (DBCP). Esta questão será mais bem analisada adiante, na terceira parte desta série de artigos.

## 7.2. Aporte térmico

Tradicionalmente, o aporte térmico ) é descrito como a quantidade de calor imposta à peça em uma operação de soldagem e calculado pela equação:

$$AT=I_m \times U_m/V_s \quad (8),$$

onde se considera como a corrente média, a tensão média da solda e a velocidade de soldagem. Esse método acometido de erro, no entanto, tanto quanto ao seu próprio cálculo, pois a potência média desenvolvida pelo arco numa solda é dada, corretamente, considerando-se valores instantâneos de corrente e tensão [9,36], assim como quanto à real contribuição desta potência para a energia absorvida pela peça [37], além de que, em sua própria definição, esta expressão representa a potência nominal fornecida, sem considerar o rendimento do processo [38]. Existe até a afirmação de que o aporte térmico é calculado pela área abaixo da curva de corrente por tempo [39], o que ajuda a evidenciar o fato de que este é um conceito que deve ser mais bem definido e padronizado. Na visão do autor, cálculos mais efetivos do aporte térmico são dados quando a energia absorvida pela peça é medida diretamente, como, por exemplo, através de calorímetros.

Essers [33] concluiu que o rendimento  $\eta$  do processo MIG, dado pela razão entre o aporte térmico à peça medido no calorímetro e a potência total do arco, é 71 %, e que grande parte do calor aportado à peça provém da gota, concordando com outros autores [5,32]. De fato, cerca de 99 % da energia necessária para a fusão do metal de solda está contida na gota metálica, que está superaquecida [32,33]. Isso vai ao encontro de resultados obtidos com polaridade direta, isto é, arame-eletrodo como pólo negativo, no qual as gotas apresentam menor nível de superaquecimento (e estão cerca de 101 K mais frias que na polaridade inversa), obtendo menos fusão do material de base [12]. Os valores mais citados na literatura para a temperatura da gota são mais altos que a temperatura de fusão do aço, e ficam em torno de 2130° C a 2400° C, com pequenas variações de acordo com a corrente de soldagem [5,33,32]. Halmoy [30] sugere uma temperatura próxima a de fusão para a gota. Considera-se a primeira faixa citada como verdadeira. Lesnewich [1] afirma, ainda, que o nível de superaquecimento da gota se reduz com a redução da corrente de soldagem (e conseqüente aumento de seu diâmetro), reduzindo a fluidez da poça metálica.

Ainda no contexto do rendimento, num dos trabalhos acima citados, no processo Plasma/MIG, cerca de 26 % da

potência gerada durante a solda é necessária para fundir o metal de solda e o restante é dissipado para o ambiente e para a peça [32]. Além disso, o principal mecanismo de transferência de calor da coluna do arco para a peça é citado como sendo convecção, e não radiação [37]. E esta porção é responsável pela largura do cordão, sua molhabilidade e características metalúrgicas da solda [32,33,37,40].

A próxima parte detalhará a questão do aporte térmico nos sistemas de controle de corrente na soldagem MIG/MAG em transferência metálica por curto circuito (MIG/MAG TMCCC).

## 8. Conclusão

O entendimento dos mecanismos físicos apresentados é de fundamental importância para o desenvolvimento de uma nova variante do Processo MIG/MAG. A lógica empregada no software de controle deve ser coerente com a dinâmica de todas as fases do processo, desde o aquecimento do arame-eletrodo até o rompimento da ponte metálica, culminando na transferência completa da gota. Para isso, devem ser consideradas também as influências dos parâmetros e variáveis envolvidas (grandezas elétricas, materiais, gases de proteção), assim como os efeitos de suas combinações de acordo com as aplicações vislumbradas (penetração, aporte térmico). Além disso, a viabilidade e as vantagens econômicas devem ser consideradas, apoiando, contradizendo ou direcionando o desenvolvimento de novos processos para cada aplicação.

## 9. Referências Bibliográficas

- [1] VAIDYA, V. Shielding gas mixtures for semiautomatic welds. *Welding Journal*. Miami, v. 81, n. 9, p.43-48, set 2002.
- [2] AMIN, M. Synergic Pulse MIG Welding. *Metal Construction*. p. 349-353, Jun. 1981.
- [3] AMIN, M. Pulse Current Parameters for Arc Stability and Controlled Metal Transfer in Arc Welding. *Metal Construction*. p. 272-278, May. 1983.
- [4] GAS Metal Arc Welding of Carbon Steel. PRAXAIR. Training Program. Sept. 1999. 50 p.
- [5] WASZINK, J. H. et al. Heat Generation and Heat Flow in the Filler Metal in GMA Welding. *Welding Journal*, Miami, v. 61, n. 8, p. 269-280, Aug. 1982.
- [6] DERUNTZ, B. D. Assessing the Benefits of Surface Tension Transfer® Welding to Industry. *Journal of Industrial Technology*. v. 19, n. 4, p. 2-8, Aug. 2003 to Oct. 2003.
- [7] BAIXO, C. E. I. Estudo da soldagem MIG/MAG pela técnica hiperbárica a seco. 1999.169 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [8] RICHARDSON, I. M. et al. The Influence of Power Source Dynamics on Wire Melting Rate in Pulsed GMA Welding. *Welding Journal*, Miami, v. 73, n. 2, p. 32-37, Feb. 1994.
- [9] DUTRA, J. C. et al. Apresentação BRASILMAQ 2004.

pps. 2004. CD. 1 arquivo. Microsoft Power Point

[10] BAIXO, C. E. I. Relatório de Atividades. Florianópolis, 02/06/2002. Relatório 42 p.

[11] STENBAKKA, N.; PERSSON, K. Shielding gases for Gas Metal Arc Welding. *Welding Journal*, Miami, v. 8, n. 11, p. 41-47, nov. 1989.

[12] TONG, H. et al. Quality and Productivity Improvement in Aluminium Alloy Thin Sheet Welding Using alternating Current Pulsed Metal Inert Gas Welding System. *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 6, n. 4, p. 203-208. 2001.

[13] SLANIA, J. Determination of the Conditions for Stable Transfer of Metal From the Electrode to the Molten Pool During MAG-Welding with Short-Circuiting and Pulsating Arcs. *Welding International*. v.10, p. 849-852. 1996.

[14] CHOI, S. K. et al. Dynamic Simulation of Metal Transfer in GMAW. *Welding Journal*, Miami, v. 77, n. 1, p. 38-51, Jan. 1998.

[15] STAVA, E. K. A New, Low-Spatter Arc Welding Machine. *Welding Journal*. p. 25-29, Jan. 1993.

[16] HSU, C.; STAVA, E. Wire Extension Measurement During Short Circuiting Metal Transfer. In: *Metal Welding and Applications*. 1999. Proceedings of the Interdisciplinary Symposium. Met Soc, 1999. p. 351-358.

[17] KIM, Y. S. EAGAR, T. W. Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding. *Welding Research Supplement*. p. 269-278, Jun. 1993.

[18] LIN, M. L. et al. Influence of Arc Pressure on Weld Pool Geometry. *Welding Journal*, Miami, v. 64, n. 6, p. 163-169, Jun. 1985.

[19] MOREIRA, A.R. et al. Líquidos: Mudanças de estado e propriedades coligativas. Salvador. UNIFACS, 20/07/1999 Relatório.

[20] KVASOV, F. V. Special Features of Mechanized Welding with Controlled Electrode Metal Transfer. *Welding International*. v. 14, n. 2, p. 158-161. 2000.

[21] IRVING, Bob. Trying to Make Some Sense Out of Shielding Gases. *Welding Journal*, Miami, v. 73, n. 5, p. 65-70, May. 1994.

[22] CHAE, Y. M. et al. A New Instantaneous Output Current Control Method for Inverter Arc Welding Machine. *IEEE*. p. 521-526. 1999.

[23] MOYER, N. The Evolution of Shielding Gas. *Welding Journal*, Miami, v. 81, n. 9, p. 51-52, Sep. 2002.

[24] IRVING, B. Shielding Gases are the Key to Innovations in Welding. *Welding Journal*. Miami, v. 78, n. 1, p. 37-41, Jan. 1999.

[25] DILLENBECK, V. R. et al. The Effects of Various Shielding Gases and Associated Mixtures in GMA Welding of Mild Steel. *Welding Journal*, Miami, v. 66, n. 9, p. 45-49, Sep. 1987.

[26] LIU, S.; SIEWERT, A. Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding: Droplet Rate. *Welding Journal*, Miami, v. 68, n. 2, p.52-58, Feb. 1989.

[27] GAS Metal Arc Welding of Stainless Steel. PRAXAIR. Training Program. Sept. 1999. 47p.

[28] CAVSTEEL. Gases de proteção para soldagem.

Disponível em [www.cavsteel.com.br](http://www.cavsteel.com.br) Acesso em 20/01/2004

[29] YI, X. et al. A numerical model of wire melting rate in CO<sub>2</sub> gas shielded welding. *Materials & Design*. n. 23, p. 501-504. 2002.

[30] HALMOY, E. Wire melting rate, droplet temperature and effective anode melting potential. In: *ARC PHYSICS AND WELD POOL BEHAVIOUR INTERNATIONAL CONFERENCE*, 1979, Londres, PAPERS. Londres: The Welding Institute, 1980, v. 1. p. 49-57.

[31] SUBAN, M.; TUSEK J. Dependence of melting rate in MIG/MAG welding on the type of shielding gas used. *Journal of Materials Processing Technology*. n.119, p. 185-192. 2001.

[32] ESSERS, W. G.; WALTER, R. Some aspects of the penetration mechanisms in metal inert gas (MIG) welding. In: *ARC PHYSICS AND WELD POOL BEHAVIOUR INTERNATIONAL CONFERENCE*, 1979, Londres, PAPERS. Londres: The Welding Institute, 1980, v. 1. p. 289-295

[33] ESSERS, W. G. et al. Heat Transfer and Penetration Mechanisms with GMA and Plasma-GMA Welding. *Welding Journal*, Miami, v. 60, n. 2, p. 37-42, Feb. 1981.

[34] KOU, S. *Welding Metallurgy*. Hoboken: John Willey and Sons, 1987, 410p.

[35] AICHELE, G. The contact tube distance in gas shielded metal arc welding – How does it work ? *Welding & Cutting*. Duesseldorf, fev. 2002. p. 80-83.

[36] CORRÊA, M. A. Diretrizes de Projeto e Qualificação Metrológica de Sistemas de Medição de Grandezas Elétricas em Processos de Soldagem a Arco. 1999. 77 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

[37] HEAT-INPUT Control Limits Distortion and Spatter. *Welding Design and Fabrication*. p. 20-22, Aug. 1999.

[38] KOU, S. *Welding Metallurgy*. 2.ed. Hoboken: John Willey and Sons, 2003, 461p.

[39] EASSA, H. E. et al. A High Performance Welding Power Source and its Application. *IEEE*. p. 1241-1244. 1983.

[40] ESSERS, W. G. Plasma with GMA Welding. *Welding Journal*. Miami, May, 1976, p. 394-400