SOLDAGEM MIG/MAG

Melhor entendimento
Melhor desempenho

2ª edição
Revisada e ampliada

Américo Scotti
Vladimir Ponomarev

Artliber
EDITORA

Américo Scotti
Vladimir Ponomarev

SOLDAGEM MIG/MAG

MELHOR ENTENDIMENTO
MELHOR DESEMPENHO

2ª edição
Revisada e ampliada

Artliber
EDITORA

Copyright© 2014 by Artliber Editora Ltda.
1ª edição 2008

Revisão:
Maria Antonieta M. Eckersdorff

Capa e composição eletrônica:
Perfil Editorial

Foto de capa
Soldagem MIG/MAG sobre uma aresta oposta de uma junta em ângulo, usando uma tocha com extração de fumos de forma indireta e integral. Apesar da geometria desfavorável para extração de fumos, a nuvem de fumos acima do bocal é aspirada pelas aberturas de sucção (sem presença de fumos sobre a nuvem), protegendo a zona de respiração do soldador (cortesia das empresas Aspirmig Srl e Plasma Team Snc., Itália)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro)

Scotti, Américo
Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho / Américo Scotti; Vladimir Ponomarev. -- SãoPaulo: Artliber Editora, 2008.

1. Soldagem MIG/MAG 2. Engenharia II. Ponomarev, Vladimir; Scotti, Américo III. Título.

08-791.1 CDD-621.791.1

Índices para catálogo sistemático:
1. Soldagem MIG/MAG: Engenharia 621.791.1

2014

Todos os direitos desta edição são reservados à
Artliber Editora Ltda.
Av. Diógenes Ribeiro de Lima, 3294
05083-010 – São Paulo – SP – Brasil
Tel.: (11) 3643-0300 Fax: (11) 3643-0309
info@artliber.com.br
www.artliber.com.br

Sumário

Notação, 11
Apresentação, 15
1 - Fundamentos da soldagem MIG/MAG, 17
1.1 - Descrição do processo MIG/MAG, 17
1.2 - Arco voltaico, 20
1.2.1 - Caracterização do arco voltaico aplicado à soldagem e suas regiões, 21
1.2.2 - Coluna de plasma, 24
1.2.3 - Abertura e manutenção de um arco, 27
1.2.4 - Jato de plasma, 30
1.2.5 - Características estáticas de arcos, 32
1.3 - Equipamento para a soldagem MIG/MAG, 34
1.3.1 - Equipamento básico: sistema fonte-alimentador-tocha, 34
1.3.2 - Painéis de controle das máquinas para soldagem MIG/MAG, 36
1.3.3 - Fontes de energia para o processo MIG/MAG, 39
1.3.4 - Alimentadores de arame, 52
1.3.5 - Tochas de soldagem, 58
1.4 - Estabelecimento do processo de soldagem, 66
1.5 - Fusão de arame: consumo e produção, 71
1.6 - Formação do cordão de solda, 77
1.7 - Arames-eletrodo, 90
1.8 - Gases de proteção, 96
1.8.1 - Caracterização dos gases de proteção, 96
1.8.2 - Tipos de gases mais utilizados no MIG/MAG e respectivas aplicações, 102
1.8.3 - Misturas de gases de proteção, 106
1.8.4 - Medição de vazão do gás de proteção, 107
1.9 - Autorregulagem do comprimento do arco, 109
1.10 - Regulagem de parâmetros de soldagem, 112
1.11 - Bibliografia para o Capítulo 1 (referenciada e para leitura complementar), 118

2 - Modos de transferência metálica no processo MIG/MAG, 121
2.1 - Forças que governam a transferência metálica, 121
2.1.1 - Teoria do equilíbrio de forças estáticas, 122
2.1.2 - Teoria da instabilidade Pinch, 130
2.2 - Modos de transferência metálica no processo MIG/MAG, 131
2.2.1 - Modos naturais de transferência metálica, 134
2.2.2 - Modos controlados de transferência metálica, 149
2.2.3 - Modos intercambiáveis de transferência metálica, 151
2.3 - Bibliografia para o Capítulo 2 (referenciada e para leitura complementar), 159

3 - Estabilidade do processo de soldagem MIG/MAG, 161
3.1 - Algumas considerações preliminares sobre a medição de parâmetros elétricos, 162
3.2 - Análise estatística do processo de soldagem MIG/MAG, 166
3.2.1 - Função da análise estatística na investigação do processo, 166
3.2.2 - Estatística: o que é e onde se aplica, 168
3.2.3 - Corrente e tensão do arco: os parâmetros do processo de soldagem mais importantes a ser analisados, 172
3.3 - Luminosidade e emissão sonora do arco como fontes adicionais de informação sobre o processo MIG/MAG, 175
3.3.1 - Aplicação da luminosidade do arco para controle e monitoramento do processo MIG pulsado, 175
3.3.2 - Uso da emissão sonora do arco, 178
3.4 - Aplicação de filmagem para análise do processo MIG/MAG, 179
3.5 - Aspectos fenomenológicos da estabilidade do processo MIG/MAG, 181
3.5.1 - Avaliação da estabilidade do arco, 181
3.5.2 - Avaliação da estabilidade da transferência metálica por curto-circuito, 185
3.5.3 - Considerações finais sobre a estimação do comportamento do processo, 187
3.5.4 - Critério laprosolda para quantificar estabilidade de transferência por curto-circuito em MIG/MAG, 189
3.6 - Bibliografia para o Capítulo 3 (referenciada e para leitura complementar), 192

4 - Processos MIG/MAG modernos com controle de transferência metálica, 195
4.1 - Transferência por voo livre, 197
4.1.1 - MIG Pulsado (MIG-P), 197
4.1.2 - MIG com pulsação térmica (MIG Duplo Pulso), 219
4.1.3 - MIG com corrente alternada (MIG-CA), 224
4.2 - MIG/MAG com curto-circuito controlado (MIG/MAG-CCC), 228

4.2.1 - Descrição de um sistema controlado eletricamente, 234
4.2.2 - Descrição de um sistema controlado eletromecanicamente, 237
4.3 - Bibliografia para o Capítulo 4 (referenciada e para leitura complementar), 240

5 - Processos MIG/MAG modernos com aumento de produção, 243
5.1 - MIG/MAG Duplo Arame, 243
5.1.1 - Influência das variáveis do processo, 245
5.2 - Processos de soldagem combinados (híbridos), 253
5.2.1 - Soldagem MIG-Laser, 254
5.2.2 - Soldagem Plasma-MIG, 260
5.3 - Bibliografia para o Capítulo 5 (referenciada e para leitura complementar), 264

6 - Tópicos avançados em processo de soldagem MIG/MAG, 267
6.1 - Sobre a relação entre as regulagens de tensão e a estabilidade do processo, 268
6.2 - Sobre a relação entre tensão e comprimento de arco, 272
6.2.1 - Influência do material de eletrodo, 273
6.2.2 - Influência do gás de proteção, 277
6.3 - Sobre a determinação das quedas de tensão nas regiões do arco, 281
6.4 - Sobre a determinação da queda de tensão na gota, 285
6.5 - Bibliografia para o Capítulo 6 (referenciada e para leitura complementar), 287

2 - Modos de transferência metálica no processo MIG/MAG

O processo de soldagem MIG/MAG, por ser um processo que utiliza eletrodo consumível, é caracterizado pela transferência de metal para a poça de fusão através do arco. Esta transferência ocorre por meio de gotas de metal fundido geradas na ponta do arame-eletrodo (com diferentes tempos de crescimento, dimensões e frequências de destacamento) e é influenciada, dentre outros fatores, pelo material e diâmetro do eletrodo, pelo gás de proteção, pela intensidade e polaridade da corrente de soldagem, pelo comprimento do arco e pela pressão ambiente. O modo pelo qual o material é transferido no arco tem grande influência sobre a estabilidade do processo e afeta fortemente a quantidade de respingos gerada, a possibilidade de soldagem em várias posições, a qualidade/geometria da solda e a aparência superficial do cordão de solda.

2.1 – Forças que governam a transferência metálica

A gota, desde o início de seu crescimento na ponta do arame-eletrodo, fica submetida à ação de uma série de forças que podem atuar favoravelmente ou não ao seu destacamento. A gota é transferida quando o somatório das forças de destacamento supera o somatório das forças de retenção (modelo conhecido como *Equilíbrio de Forças Estáticas*). No caso, as principais forças que agem sobre a gota são: *força gravitacional (F_g); força eletromagnética (F_{em}); força devido à tensão superficial do metal fundido (F_γ); força de arraste dos gases (F_a); e força de vaporização (F_v)*. Estas forças estão ilustradas esquematicamente na Figura 2.1 e serão descritas a seguir.

O mecanismo de destacamento se altera quando a corrente de soldagem supera um certo valor, denominado de corrente de transição (a ser definida e tratada no Item 2.2.1). Acredita-se que o mecanismo que passa a atuar predominantemente sobre a transferência das gotas seja

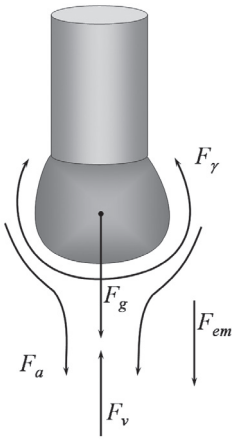


Figura 2.1 – Forças governantes da transferência metálica no processo de soldagem MIG/MAG, onde F_γ representa a força devido à tensão superficial, F_g à gravidade, Fem ao efeito eletromagnético, F_a ao arraste pelo fluido e F_v à vaporização

o denominado de *Instabilidade Pinch*, o qual também será descrito na sequência (na verdade, nenhum dos modelos propostos — Equilíbrio de Forças Estáticas e *Instabilidade Pinch* — para explicar as forças que agem sobre a transferência, são comprovados na prática, tanto por poder existir mais forças desconhecidas atuando concorrentemente como pela própria deficiência em se modelar o comportamento real de cada uma das identificadas).

2.1.1 – Teoria do equilíbrio de forças estáticas

Força gravitacional (F_g)

É a força originada pela ação da gravidade, que, por depender da massa, é governada pela dimensão e densidade do material da gota, como quantifica a Equação 2.1 (onde d_g é o diâmetro da gota; ρ é a densidade do metal líquido e g a aceleração da gravidade), ao se assumir a gota em crescimento como uma esfera. Assim, a intensidade de sua atuação é condicionada ao volume da gota que é crescente até que se rompa o equilíbrio para haver seu destacamento.

$$F_g = \frac{\pi}{6} d_g^3 \rho g \tag{2.1}$$

A força gravitacional pode atuar de forma favorável ou não, evento que irá depender da posição de soldagem. Existem dois aspectos que devem ser analisados em relação a este favorecimento ou não, e o leitor deve ter esta visão em mente para o melhor entendimento. Uma coisa é facilitar ou não o destacamento da gota em si. Como ilustra a Figura 2.2, nos casos em que a solda é realizada na posição plana (eletrodo a 0^0) até a posição em que o eletrodo fica num plano horizontal (eletrodo a 90^0), a força da gravidade estará sempre agindo no sentido de destacar a gota. Quando o eletrodo toma uma posição angular de 90 a 180^0 (das posições horizontal ou vertical até sobrecabeça), haverá uma componente da força da gravidade forçando a gota contra o eletrodo (dificultando a transferência), a qual será máxima em 180^0.

Mas um segundo aspecto se relaciona com o fato de a força da gravidade favorecer ou não a transferência da gota na direção da poça, assunto que tem consequências no que foi tratado no Item 1.6 como efeito da Quantidade de Movimento Transferido por Unidade de Comprimento de Solda. Neste caso, só haverá concordância entre o sentido da força da gravidade e do eixo do arco quando o eletrodo estiver a 0^0 (quando esta quantidade de movimento é máxima). Nas demais posições, a gota sempre tenderá a desviar verticalmente para baixo. E este fenômeno, se não superado, pode prejudicar a formação do cordão. De qualquer forma, uma característica interessante do efeito da F_g é a de que continua agindo mesmo depois que a gota se destacou.

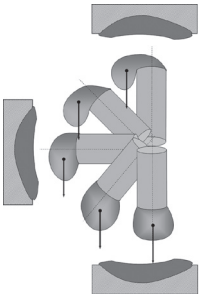


Figura 2.2 – Ilustração da força gravitacional e de sua atuação no destacamento das gotas, frente ao posicionamento espacial do eletrodo

Força associada à tensão superficial (F_γ)

Deve-se lembrar que, no interior de um líquido, a força resultante sobre cada átomo é pequena ou nula. Mas, na superfície, a resultante de atração é para o interior, pois a densidade molecular é maior dentro de um líquido do que num gás ou plasma, como no meio em que uma gota em soldagem se desenvolve. E que a gota em desenvolvimento tem sua área superficial também em crescimento. Assim, haverá demanda de energia para criar esta nova área. Este energia se chama energia livre de superfície (simbolizado por γ), cuja unidade no SI é J/m^2. Mas, para simplificar, tomemos por analogia um conta-gotas. Quando apertamos levemente o gotejador, a gota cresce e, quando o liberamos, a gota reduz de tamanho. Isto demonstra haver demanda de uma força para criar uma área (ou um novo perímetro). Esta força se chama *tensão superficial* [21] ($F_\gamma = \pi.d_g.\gamma$, onde d_g é o diâmetro da gota,), cuja unidade é N (sabe-se que 1 J = 1 N x m). Porém, pode-se demonstrar que a tensão superficial de um material num dado meio é numericamente igual à energia livre de superfície. E ambas são propriedades de um material, em função da temperatura e do meio.

Seguindo esta linha de raciocínio, um material líquido, por natureza, sempre tende a ter a menor relação entre a área superficial e o seu volume, o

[21] - O termo tensão, apesar de não ser o mais adequado para esta característica dos materiais, é universalmente utilizado.

que acontece quando se toma a forma esférica e seu volume é cada vez maior (estas condições são de menor energia livre). Por isto, a gota na ponta do eletrodo tende a tornar-se mais volumosa à medida que o eletrodo se funde, apesar de a força, devido à tensão superficial, ser crescente (maior perímetro). E esta força (devido à tensão superficial) retém a gota na ponta do eletrodo, dificultando a sua transferência. Se não houvesse outras forças em sentido contrário, como a força da gravidade, o volume de uma gota cresceria infinitamente. Mas como F_γ cresce (retendo a gota) em proporção direta com o diâmetro, enquanto sua oponente F_g (que na posição plana facilita o destacamento da gota) aumenta em proporção do diâmetro ao cubo (ver Equação 2.1), vai haver um momento em que a gota destaca-se, como ilustra a Figura 2.3. O diâmetro em que este fenômeno acontece se denomina de *diâmetro crítico* (a dificuldade de determinar este valor na prática se deve à incerteza da determinação dos valores de γ e ρ, que dependem da composição e temperatura do metal e do meio, e do próprio formato real da gota).

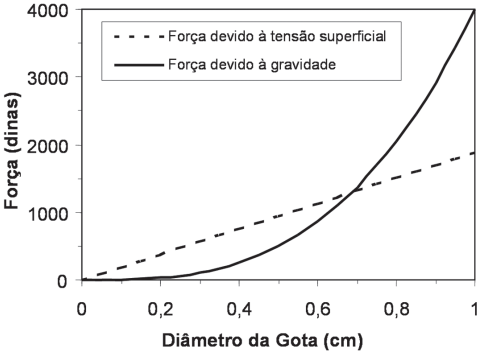


Figura 2.3 – Crescimento competitivo entre as forças da gravidade (F_g) e, devido à tensão superficial (F_γ), caracterizando o diâmetro crítico em que a gota se destaca

Podem ocorrer situações em que F_γ passa a facilitar a transferência. Como a energia livre de superfície torna-se menor na poça de fusão (menor área de superfície livre por volume), o contato de uma gota com a poça faz com que a força, devido à tensão, superficial puxe-a para dentro da poça. Assim, enquanto não houver contato gota/poça, a força, devido à tensão superficial, é contrária à transferência, mas passa a favorecê-la quando há o contato, como ilustra a Figura 2.4. Usando ainda a analogia do conta-gotas, uma gota em condição estável em sua ponta é sugada para dentro do copo ao tocá-la na superfície da água, sem a necessidade de apertar a mais o gotejador.

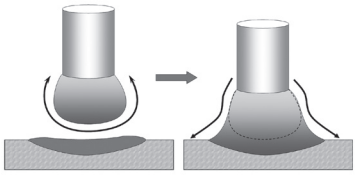


Figura 2.4 – Alteração na direção de atuação da força devido à tensão superficial para quando, devido a uma redução no comprimento do arco, a gota encosta na poça antes de atingir o diâmetro crítico

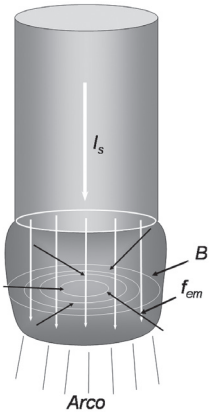


Figura 2.5 – Fenômeno da geração das forças eletromagnéticas (radias) na gota de metal líquido de forma cilíndrica

Força eletromagnética (F_{em})

Como ilustra a Figura 2.5, um condutor elétrico gera ao seu redor um *campo magnético* (cuja *intensidade de fluxo* é representada pelo vetor *B*), que por sua vez, induz forças radiais (f_{em}) no sentido do centro do condutor. Quanto maior a corrente, maiores são estas forças ($f_{em} = \mu\ (J \times B)$, onde μ é permeabilidade magnética do material do condutor e *J* a densidade de corrente). Estas forças, denominadas de *Forças de Lorentz*, já foram comentadas no Item 1.2.4, mas naquele momento se estava tratando da condução de corrente pelo plasma. Neste item, o alvo é a corrente conduzida através da gota em formação. Para condutores sólidos, o efeito dessas forças pode ser desprezado, mas para um condutor líquido (como a gota metálica), cada unidade de volume é submetida à f_{em}, que tenta deslocar o material no sentido da superfície para o centro do condutor, na forma de compressão. Como a pressão é uma grandeza escalar (independe da direção ou sentido) e como a parte não fundida do eletrodo não é relativamente deformável, a gota tende a se alongar na direção oposta ao eletrodo.

Porém, a partir da Equação 2.2[22], pode-se verificar que a pressão devido à força eletromagnética (P_{fem}) é dependente do raio do condutor (*R*) e da posição no plano em que se está medindo-a (*r*), ou seja, para seções transversais maiores (grandes *R*), a pressão máxima é menor. No centro da seção ($r = 0$), a pressão é máxima. E sabe-se que um fluído sempre se movimenta do ponto de maior pressão para o de menor pressão. No caso de gotas, o formato tende à esfera, mas sob o ponto de vista deste livro, o que é importante é a seção de condução da corrente, que depende das áreas de acoplamento da gota no arame e do arco na gota, que, por sua vez dependem, entre outros efeitos, da polaridade, da intensidade da corrente e do diâmetro do arame.

[22] - Não é objetivo deste livro demonstrar esta equação, encontrada na literatura mais especializada.

$$P_{fem}(r) = \frac{\mu I^2}{4\pi^2 R^2}\left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \tag{2.2}$$

Mas há dois momentos de influência da F_{em} sobre a gota, inicialmente quando de sua formação e, finalmente, no processo do seu destacamento. Como esquematiza a Figura 2.6, quando a corrente é alta, há mais concentração de fluxo de corrente na parte de cima da gota ($R_2 > R_1$), fazendo com que a maior pressão se dê nesta região, impulsionando o volume de crescimento da gota no sentido de destacamento. Porém, no caso de baixa corrente, a maior concentração se dá na parte de baixo da gota ($R_4 < R_3$), fazendo com que, neste caso, o efeito da força eletromagnética seja o de empurrar o volume da gota contra o arame.

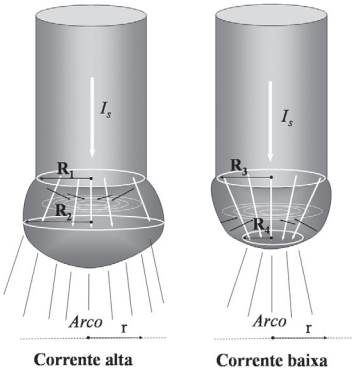


Figura 2.6 – Ilustração da direção do movimento da gota devido à força eletromagnética. A intensidade para ser considerada corrente alta ou baixa depende de vários fatores, como diâmetro e material do arame e composição do gás de proteção

Mas o efeito eletromagnético vai além de direcionar o fluxo de crescimento da gota. Quando esta alcança um volume próximo ao de seu diâmetro crítico, começa a formar um empescoçamento da gota no acoplamento com o arame, como ilustrado na Figura 2.7, em função de outras forças atuando sobre ela e da reação da parte sólida do eletrodo ao sentido do fluxo imposto pela F_{em}. No caso, há uma redução da seção transversal próximo ao arame e um crescimento da densidade de corrente de forma abrupta, fazendo uma grande pressão nesta área. Semelhantemente a "estrangular" a seção de cima de um balão de aniversário, como resultante, a gota é impulsionada para a frente favorecendo seu destacamento (este efeito é deno-

minado de *efeito Pinch*, devido à semelhança com um arremesso). Qualquer que seja a corrente de soldagem, o *efeito Pinch* favorece o destacamento da gota, pois a secção no empescoçamento é sempre menor do que a área de acoplamento do arco.

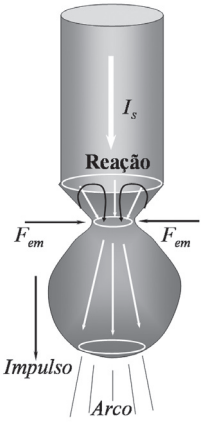


Figura 2.7 – Ilustração do efeito da F_{em} no processo de empescoçamento. O estrangulamento brusco e a reação ao movimento do metal líquido na direção do arame em estado sólido dão um impulso na gota, facilitando o seu destacamento

Deve-se destacar ainda que, supostamente, a F_{em} não atua mais sobre a gota após o destacamento. Para atuar, a corrente teria de ser conduzida não só pelo arco, mas também pela gota em viagem para a chapa, fato não impossível, pois estes autores já verificaram que, para algumas composições de gás de soldagem, a resistência elétrica da gota é menor do que a do plasma. Mas, mesmo que conduzindo corrente, haveria (assumindo o eletrodo conectado no polo positivo e a gota como uma esfera) na calota superior da gota uma conexão catódica de arco e na calota inferior a conexão anódica. E mesmo considerando áreas diferentes em cada conexão, haveria pouca divergência de corrente. Além disso, se houvesse a duplicação das conexões anódicas e catódicas, a tensão de arco seria praticamente dobrada, o que não acontece na prática.

A influência da corrente merece uma análise mais detalhada. À medida que a corrente é regulada para valores cada vez mais altos, o raio do acoplamento do arco com a gota cresce até superar, em um determinado ponto, o valor do raio do arame-eletrodo. Neste momento, a força F_{em} que atuava contrariamente à transferência metálica, muda de direção e passa a favorecer o destacamento da gota. Como consequência, ocorre uma redução do tempo da formação da gota até o destacamento, causando um aumento da frequência da transferência e redução do tamanho da gota, gradativamente, mas em crescimento exponencial, com o aumento da corrente, chegando a um nível de corrente em que as gotas não conseguem atingir grandes dimensões. Esta é uma das teorias para explicar o fenômeno denominado de *corrente de transição (I_{tr})*, o qual será tratado também no Item 2.2.1. A segunda teoria, e mais aceita hoje em dia, é descrita ao final deste item sob o título de *Teoria da Instabilidade Pinch*.

Força de arraste (F_a)

A força de arraste é originada pelo jato de plasma em contato com a gota. Por questões aerodinâmicas, depressões são geradas sob a gota (vórtexes), como ilustrado na Figura 2.8, fazendo com que esta seja sugada e arrastada pelo fluxo. Desta forma, a F_a contribui sempre para o destacamento da gota.

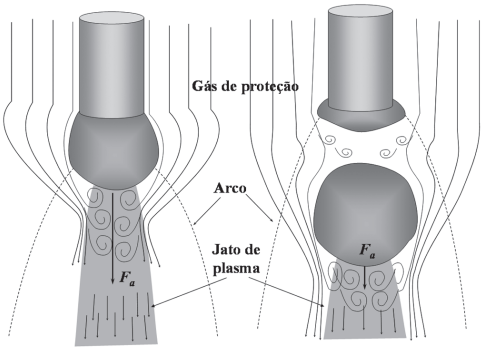


Figura 2.8 – Ilustração do fenômeno da geração da força de arraste pelo fluxo do gás ao longo da gota: antes e depois do destacamento

De forma similar à F_g, a F_a continua agindo mesmo depois que a gota se destacou (pois a velocidade do jato de plasma é sempre maior do que a da gota em viagem) e é crescente à medida que se aproxima da chapa. Como ilustra a Figura 2.8, após o destacamento poderá haver vórtex sobre a gota, mas com uma depressão menor, de tal modo que a resultante é sempre na direção da transferência.

A F_a é dependente da dimensão da gota, da densidade e da velocidade do jato de plasma e do respectivo coeficiente de arraste do sistema. É por este motivo que, em baixas correntes (em que o tamanho da gota é grande, apesar de a velocidade do jato de plasma ser menor), ela passa a ser relativamente mais significativa na transferência do metal.

Existem fenômenos que caracterizam bem a importância da F_a. Como ilustrado na Figura 2.9, durante uma soldagem com corrente pulsada (a ser detalhada no Item 4.1.1), logo após o destacamento de uma gota principal (de ≈ 4,5 a 5,0 ms), houve um destacamento ocasional em sequência de uma segunda gota (de ≈ 6,5 a 7,0 ms). Mas, por algum motivo, esta gota imobilizou-se por um tempo durante sua trajetória e, após um momento, foi capturada pela ponta do eletrodo (de ≈ 8,5 a 9,0 ms). Acredita-se que, como a corrente

tornou-se baixa nesse momento, a força de arraste ficou pequena e possivelmente apareceu uma depressão sobre a gota, que contrabalanceou o efeito da depressão sob a gota aliado à força da gravidade. O leitor poderia perguntar o porquê desse fenômeno não acontecer sempre. Deve-se lembrar de que se trata de uma regulagem inadequada de parâmetros para corrente pulsada, mas principalmente de que, para haver a ocorrência desse fenômeno, é necessária uma série de coincidências das ações das forças. Isto não quer dizer que não aconteça com frequência, mas este fenômeno só é percebido com aparelhagem laboratorial especial.

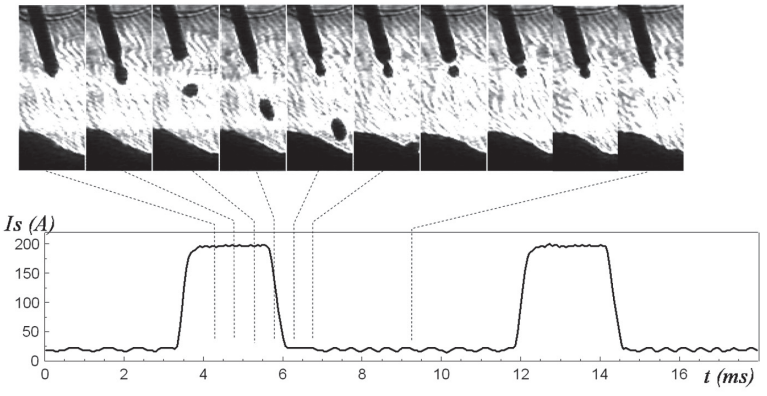


Figura 2.9 – Monitoramento do destacamento de gotas com ênfase no fenômeno de retorno ao eletrodo da segunda gota (arame AWS ER4043 - AlSi5.0 - diâmetro de 1,0 mm, protegido com argônio)

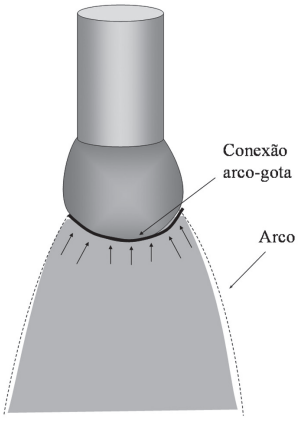


Figura 2.10 – Esquematização do efeito da força de reação por vaporização sobre a transferência metálica

Força de reação por vaporização (F_v)

A força de reação é originada pela vaporização dos componentes do metal do arame-eletrodo na região do acoplamento do arco com a gota (Figura 2.10). Como visto no Item 1.2.1, nesta conexão origina-se muito calor, acarretando geração de jatos de vapores metálicos. A ação dessa força é de quatro a cinco vezes menor na polaridade positiva (eletrodo é ânodo) do que na polaridade negativa (eletrodo é cátodo). A explicação mais coerente é de que, devido a maior área da mancha anódica e a sua menor densidade de corrente, a intensidade da vaporização é menor comparativamente com o que acontece com a mancha catódica.

Caso o acoplamento do arco se dê somente na calota inferior da gota, esses jatos exercem uma força de reação sobre a gota, tendendo a mantê-la mais tempo retida (maior diâmetro crítico). Valores mais altos de corrente e presença de elementos de elevada pressão de vapor[23] no arame-eletrodo aumentam essa força. Mas correntes muito elevadas ou o uso de gases com baixa capacidade de troca de calor podem fazer com que o arco envolva toda a gota, o que dificulta a análise do efeito da vaporização sobre o destacamento desta. Por outro lado, o acoplamento do arco pode ficar restrito a uma pequena área sob a gota, causado, por exemplo, pela alta capacidade de troca de calor dos gases de proteção (por exemplo, He e CO_2), fazendo com que o núcleo de condução do arco fique reduzido. Este fato pode localizar demasiadamente a força de reação e, se ela ocorrer fora da linha de centro da gota, pode desviá-la de sua trajetória normal (braço de alavanca), repulsando-a e facilitando gerar respingos. Após a gota ter sido desviada, os jatos do plasma repelidos da peça podem mantê-la fora de posição por longos períodos, conforme ilustrado na Figura 2.11, caso típico de soldagens MAG com CO_2 puro como gás de proteção. Pelas mesmas razões apresentadas para o efeito da força eletromagnética, não se deve esperar ação do efeito da F_v quando a gota já estiver destacada.

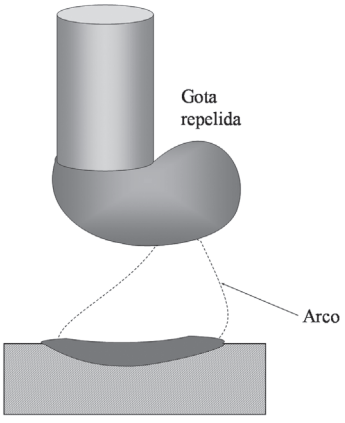


Figura 2.11 – Esquematização do desvio da gota devido a arco com conexão concentrada e fora da linha de centro

2.1.2 – Teoria da instabilidade Pinch

Tem sido demonstrado pelos pesquisadores contemporâneos que, abaixo da corrente de transição (Item 2.2.1), a transferência é dominada pelas forças descritas na teoria do balanço de forças estáticas. Mas acima, a transferência metálica torna-se mais dinâmica e aquela teoria do balanço de forças estáticas já não satisfaz. Neste caso esta pode ser

[23] - Pressão de vapor é a pressão de um vapor em equilíbrio com suas fases condensadas (não vaporizadas). O termo é usado mais frequentemente para descrever a tendência do líquido em se evaporar. Quanto mais elevada a pressão de vapor de um material em uma dada temperatura, menor a temperatura de evaporação.

explicada por outras teorias, como por exemplo, a da *Instabilidade Pinch*[24]. De uma forma simplificada, acima de certo valor de corrente e, consequentemente, com uma maior geração de calor, a ponta fundida no eletrodo torna-se cilíndrica e não mais em formação progressiva de uma gota, como num conta-gotas. O rompimento desse cilindro em gotas sequênciais decorre da instabilidade da coluna de líquido, pois é iniciando a partir de constrições locais (Figura 2.12) que acontecem de forma caótica. Pode-se dizer que dois fatores antagônicos determinam o comportamento desse fenômeno. Por um lado, a tensão superficial, que tende a reconstruir a superfície cilíndrica (ou seja, anular a constrição inicial), procurando uma menor área por volume. Por outro, o efeito *Pinch*, que após uma constrição aparecer tende a constringi-la ainda mais. Quando o efeito *Pinch* supera o efeito da tensão superficial, a coluna se rompe e uma pequena gota residual se forma. No caso, os efeitos das outras forças (força gravitacional, força de arraste e força de vaporização) passam a ser desprezíveis.

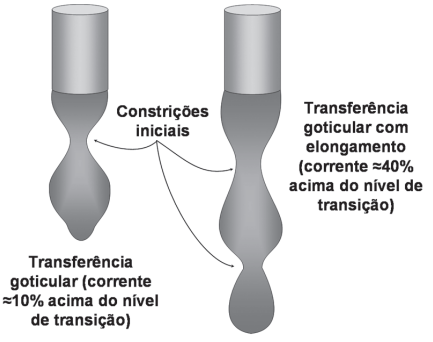


Figura 2.12 – Ilustração do fenômeno de instabilidade da coluna de metal líquido conforme a Teoria da Instabilidade Pinch

2.2 – Modos de transferência metálica no processo MIG/MAG

Modo de transferência define um comportamento característico da gota em transferência, como grandes gotas atravessando da ponta do eletrodo para a poça, em contraste com pequenas gotas fazendo o mesmo trajeto, mas uma consecutivamente a outra (cada um seria um modo de transferência, como será visto adiante). Mas pode-se ter um número de modos de transferência com características similares, situação que os

[24] - Uma definição mais conceitual sobre a "Instabilidade Pinch" pode ser encontrada no artigo de S. W. Simpson & Peiyuan Zhu, *Formation of molten droplets at a consumable anode in an electric welding arc*, J. Phys. D: Appl. Phys. 28 (1995) 1594-1600.

autores deste livro congregam os modos sob a denominação de **grupo de modos**. Existem ainda as **classes de modos**, que são camadas mais altas hierarquicamente de agrupamento dos modos de transferência. Sendo assim, na soldagem MIG/MAG, distinguem-se três classes de modos de transferência metálica, a saber, naturais, controlados e intercambiáveis, como ilustrado na Figura 2.13.

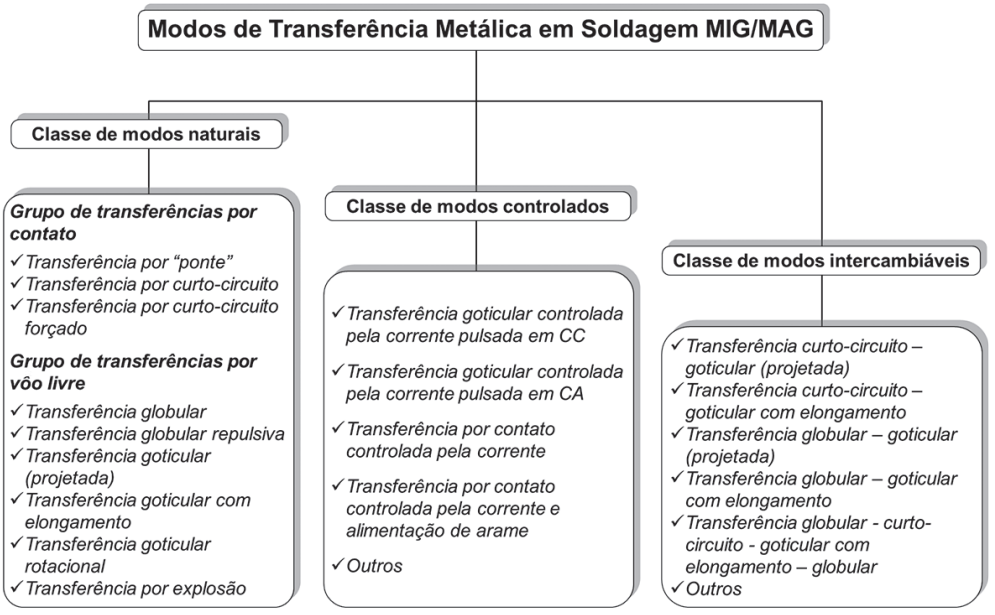
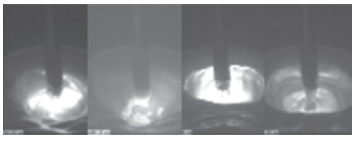
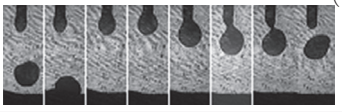
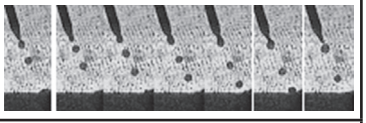
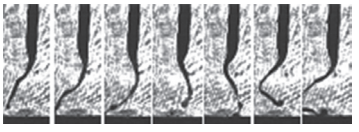


Figura 2.13 - Classificação dos modos de transferência metálica conforme a ordem hierárquica (classes, grupos e modos)

A transferência metálica da classe natural acontece basicamente por dois mecanismos, os quais caracterizam os seus dois grupos. No primeiro, há o contato da gota com a poça antes do destacamento e, por isto, esse grupo de transferência é denominado transferência por contato, que pode se manifestar por modos de transferência por "ponte", por curto-circuito ou por curto-circuito forçado. Já no segundo mecanismo, a gota destaca-se antes do contato com a poça, caracterizando o grupo batizado de transferência por vôo livre. Este último se subdivide ainda em seis diferentes modos, conforme as particularidades da formação e destacamento das gotas. A Tabela 2.1 ilustra os principais modos naturais de transferência do processo MIG/MAG.

Tabela 2.1 – Classes e respectivos modos naturais de transferência metálica que acontecem no processo MIG/MAG

Grupos de transferência	**Modo de transferência**	**Imagem**	**Força (efeito) governante principal**
Por contato	Por curto-circuito		Tensão superficial e efeito *pinch*
	Por "ponte"		Tensão superficial
	Por curto-circuito forçado		Eeito *pinch* pronunciado
Por voo livre	Globular	(*) 	Gravitacional
	Globular repulsiva		Força gravitacional e forças de repulsão
	Goticular (ou goticular projetada)		Força eletromagnética
	Goticular com elongamento		
	Goticular rotacional		
	Explosiva		Força eletromagnética e reações químicas

(*) Essa sequência das imagens foi uma cortesia dos colegas Stephan Egerland e Josef Artelsmair, da empresa Fronius.

Os modos de transferência podem também ser apresentados como em função dos parâmetros de regulagem do processo e tipos de gases de proteção, como ilustra a Figura 2.14. Durante a descrição desses modos, o leitor vai entender melhor os campos apresentados nessa figura. Procurou-se apresentar duas versões, pois, apesar de ser a tensão um parâmetro de regulagem do processo, o que importa na transferência, como será visto, é o comprimento do arco (como em MIG/MAG existe uma relação de proporcionalidade entre comprimento de arco e a tensão, mas também existe uma correlação entre tensão e corrente, veja Item 1.2.5, os mapas assumem formas um pouco diferenciadas). Os campos dos modos Globular Repulsiva e Explosiva não são apresentados nos mapas, pois eles se sobrepõem aos campos de Globular e Goticular. Além disso, as transferências Globular Repulsiva e Explosiva são governadas mais pelo gás de proteção e material do arame, respectivamente, do que pela corrente e tensão (comprimento do arco). É importante ressaltar que entre os campos de modos existem zonas de intercessão, nas quais pode aparecer instabilidade de transferência causada pela transição entre dois modos.

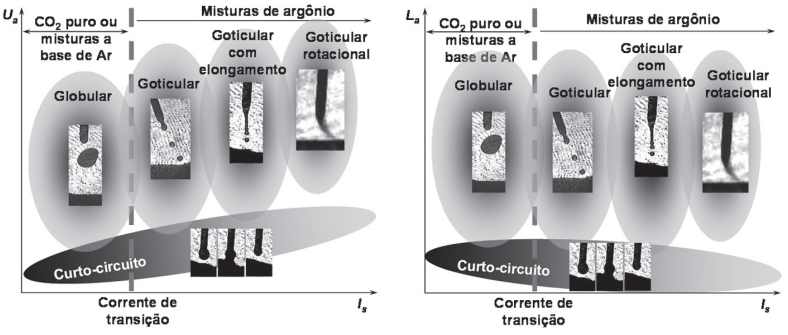


Figura 2.14 – Mapas esquemáticos e qualitativos dos campos de incidência dos modos principais de transferência metálica em MIG/MAG, em função da corrente e da tensão (à esquerda) e do comprimento de arco (à direita)

2.2.1 – Modos naturais de transferência metálica

Transferência metálica por curto-circuito

Neste modo de transferência por contato, a ponta do eletrodo, formada por uma gota de metal líquido em crescimento, atinge periodicamente a poça de fusão, ocasionando um curto-circuito elétrico e a extinção momentânea do arco. A transferência por curto-circuito ocorre geralmente em correntes e tensões de soldagem baixas (baixa força eletromagnética, permitindo um grande raio crítico da gota e arcos curtos o

suficiente para que a gota toque a poça antes de se destacar), como pode ser identificado na Figura 2.14. A frequência de transferência de curtos-circuitos varia classicamente de 20 a 200 vezes por segundo. A Figura 2.15 mostra o comportamento dos sinais de corrente e de tensão durante este modo de transferência. Pode-se perceber que a tensão cai bruscamente quando a gota toca a poça (início do curto-circuito) e permanece baixa até o fim do curto-circuito, enquanto a corrente (denominada de *corrente de curto-circuito*) aumenta rapidamente, decaindo apenas após o destacamento da gota.

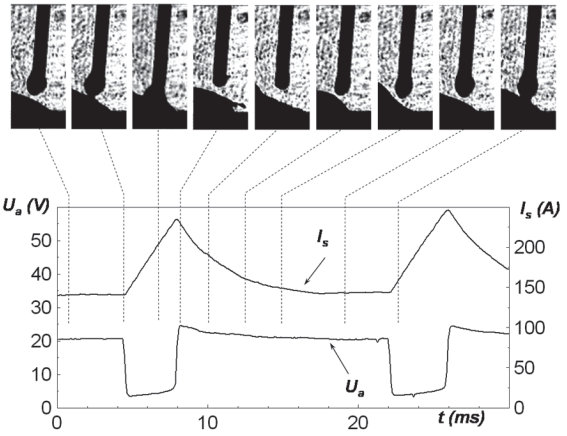


Figura 2.15 – Oscilogramas típicos de tensão e de corrente durante a transferência por curto-circuito em função do comportamento da gota em crescimento e destacamento

A seguir é descrito o mecanismo da transferência por curto-circuito, que é apresentado na literatura corrente de maneira, normalmente, muito simplista. Apesar de que em média haja um equilíbrio entre a taxa de fusão e a velocidade de alimentação nas soldagens com esse modo de transferência, pode-se dizer que imediatamente após o fim do curto-circuito a taxa de fusão de eletrodo torna-se maior do que a de alimentação, graças ao valor elevado da corrente de pós-curto-circuito. Ou seja, imediatamente após o rompimento do curto-circuito, o comprimento do arco cresce rapidamente, enquanto uma nova gota começa a se formar na ponta do arame-eletrodo. O comprimento de arco alcançado depende de vários fatores, sendo os de maior importância, como ilustra a Figura 2.16, as regulagens de tensão de soldagem e gradientes de subida e descida de corrente (o arco pode se tornar tão longo que permitiria até a passagem ocasional de gotas em voo livre, Figura 2.16(b)).

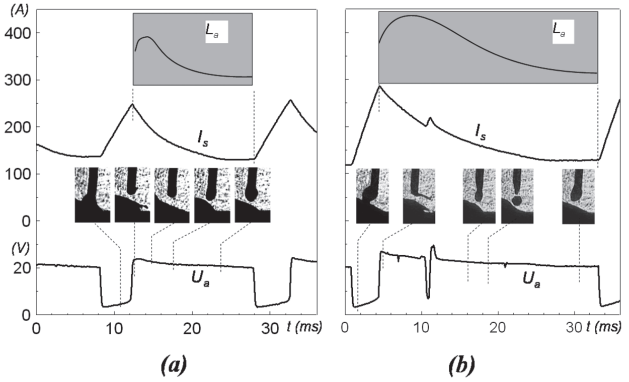


Figura 2.16 – Alteração do comprimento do arco durante da fase de arco aberto para o processo MIG/MAG com transfência por curto-circuito. Em (a), a tensão de regulagem (Ua = 18 V) é menor do que em (b) (Ua = 20,5 V), assim como é menor o gradiente de subida e maior o de descida da corrente de curto-circuito, resultando numa corrente de pós-cuto-circuito mais baixa e atuando por um período mais curto

Nos primeiros milisegundos após a reabertura de arco, as taxas de fusão e de alimentação se igualam, devido à redução de corrente, para em seguida, ainda sob ação do arco, a primeira se tornar um pouco menor do que a de alimentação, fazendo a ponta do arame aproximar-se gradualmente da poça[25]. Mas isto não significa que durante a fase restante de arco aberto haja uma aproximação progressiva da gota à poça de fusão, ou seja, uma redução gradual do comprimento de arco. Oscilações mútuas da gota (que está em crescimento permanente, acumulando o metal fundido) e da superfície da poça acarretam alterações do comprimento de arco ao redor de um valor médio de 1 a 2 mm, até um novo curto-circuito acontecer. Claro que à medida que o tamanho da gota aumenta, a probabilidade de um curto-circuito acontecer também aumenta (espaço limitado entre a ponta do arame e poça).

Como já visto (Item 2.1), a principal força agindo sobre a gota durante a transferência curto-circuito é a que decorre da tensão superficial. Mas não se pode esquecer de outra força atuante, a saber, a que resulta do efeito *Pinch*, que pode atuar contra ou a favor da transferência. Lembra-se que o efeito *Pinch* atua no sentido de separar um elemento de seção transversal maior (por exemplo, gota ou poça de fusão) de um ele-

[25] - É comum se encontrar em livros a afirmação de que durante o curto-circuito a taxa de fusão torna-se menor do que a taxa de alimentação para compensar a maior taxa de fusão durante o arco aberto. Esta afirmação nos parece carente de argumento, pois, no caso, o arame entraria ainda sólido.

mento com seção transversal menor (por exemplo, no ponto de contato entre gota-poça); o componente radial da força eletromagnética tende a comprimir a área de contato, enquanto o axial tende a separar a gota da superfície da poça de fusão. Sendo assim, durante a fase inicial do curto--circuito, o formato da ponte gota-poça favorece o efeito *Pinch* atuar contra a transferência, embora com baixa intensidade (corrente baixa). Mas ao final do curto-circuito, pouco antes de a gota se transferir, forma-se um empescoçamento entre a gota em transferência e a ponta do arame, devido à tensão superficial. O alto valor da corrente e a pequena área da seção transversal nesta região provocam um aumento da ação do efeito *Pinch*, agora facilitando a transferência final da gota para a poça. Ainda sob efeito da elevação da corrente, o aquecimento súbito da ponte de metal líquido entre o eletrodo e a poça de fusão colabora para o seu rompimento (como num fusível elétrico).

Este rompimento pode ocorrer de forma mais ou menos violenta (dependente do valor de corrente neste momento, que por sua vez é determinado pela indutância), fator governante da geração de respingos. Por um lado, indutância baixa determina um gradiente elevado de subida de corrente de curto-circuito, acarretando numa ação separativa exagerada pelo efeito *Pinch* no instante inicial de estabilicimento do contato entre a gota e a poça. Esta condição (curto-circuito incidental) causa repulsões da gota pela superfície da poça, chegando até a separar violentamente a gota da ponta de eletrodo, gerando respingos de grandes dimensões. Por outro lado, indutância alta reduz o gradiente de subida de corrente de curto-circuito e, assim, minimiza a probabilidade de ocorrência de tais repulsões. Mas, ao mesmo tempo, caso a corrente se eleve de forma muito lenta, a gota em curto-circuito pode levar um longo tempo sem se romper e a ponta do arame-eletrodo pode acabar mergulhando na poça de fusão. Neste caso, o processo pode ser interrompido (apagamento permanente do arco). Desta forma, a taxa de subida da corrente de curto-circuito deve ser alta o bastante para proporcionar a transferência da gota, mas baixa o suficiente para minimizar a geração dos respingos.

Para realizar o controle da taxa de alteração da corrente (crescimento e decaimento), as fontes de soldagem geralmente possuem o recurso de controle da indutância (ver Item 1.3). A Figura 2.17 exemplifica duas soldagens com transferência por curto-circuito, mas com controle

diferenciado da indutância. O curto-circuito sendo rompido, o arco se restabelece totalmente. Após o rompimento da ponte metálica, a tensão sobe, caracterizando um pico de reignição, o qual vai ser maior ou menor, dependendo das condições serem mais ou menos favoráveis para tal. Existem evidências de que uma vez acertada a faixa adequada de indutância de subida, é a taxa de descida da corrente que controla realmente a transferência.

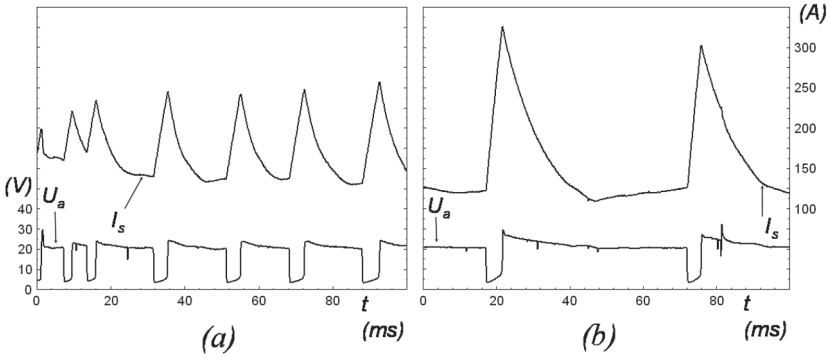


Figura 2.17 – Oscilogramas típicos de tensão e de corrente durante a transferência por curto-circuito (à esquerda, a indutância do sistema era alta, levando a menores valores de corrente de curto-circuito; à direita, a indutância era menor)

Finalmente, a transferência por curto-circuito é de natureza aleatória, a qual se reflete na variabilidade da duração do curto-circuito, do tempo de arco aberto (ou do tempo entre curtos-circuitos) e nas formas irregulares das curvas de tensão e de corrente de soldagem (Figura 2.18). O grau de aleatoriedade vai depender da regulagem mais ou menos apurada da tensão e indutância, para uma dada velocidade de alimentação e combinação gás de proteção/arame-eletrodo. Nas condições mais adversas, como ilustrado na referida figura, observam-se muitos curtos-circuitos do tipo incidentais (ou seja, aqueles de curtíssima duração que podem acontecer antes de um curto-circuito normal). A natureza do curto-circuito incidental é relacionada, além de com as forças normalmente atuantes (tensão superficial, eletromagnética, gravitacional etc.), com o movimento caótico da superfície da poça de fusão e da gota formada na ponta de eletrodo. Caso o balanço destas forças não seja favorável, a gota será repelida no momento em que encosta na poça, e o curto-circuito não será acompanhado de transferência metálica propriamente dita. Claro que este tipo de curto-circuito pode gerar respingos.

Devido aos valores baixos de corrente e de tensão durante a fase de arco aberto, assim como o fato de que durante parte do processo o arco tende a se apagar, o calor transferido para a peça é reduzido. Esta característica torna a soldagem por curtos-circuitos muito adequada para chapas finas e soldagem fora da posição plana (inclusive sobrecabeça). A poça de fusão com pequenas dimensões e o arco curto o bastante para limitar o crescimento excessivo das gotas acarretam uma alta controlabilidade deste processo. Em contrapartida, no caso de soldagem de chapas grossas, pode ocorrer falta de fusão. Neste sentido, existe uma grande dificuldade em se soldar alumínio com este modo de transferência, pois a alta condutibilidade térmica deste material faz com que a poça resfrie e solidifique rapidamente, dificultando a fusão do metal de base e aprisionando gases (originando porosidades).

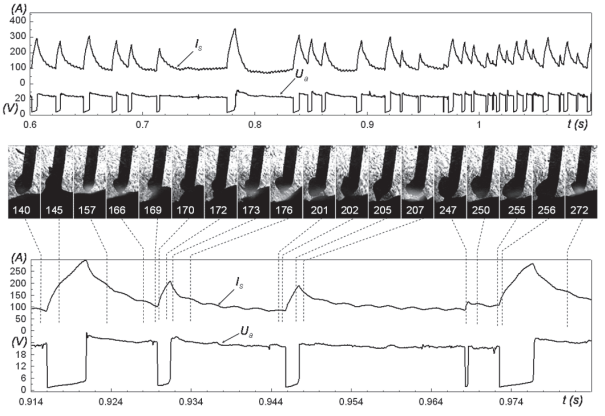


Figura 2.18 – Oscilogramas de tensão e de corrente do processo de soldagem MIG/MAG usando uma fonte eletromagnética, evidenciando o comportamento aleatório da transferência (2000 quadros por segundo). O oscilograma de baixo representa uma ampliação do de cima (proteção com CO_2 puro, arame de aço carbono de 1,2 mm de diâmetro, U_a de 22 V; I_s de 140 A e V_{alim} de 4 m/min)

Transferência metálica por "ponte"

A transferência por "ponte", também pertencente ao grupo de transferência por contato, acontece quando o arame é sujeito a muito baixo valor de corrente de curto-circuito durante o contato gota-poça. A tensão superficial torna-se a força motriz para a transferência, reduzindo a importância do efeito *Pinch* no destacamento da gota. Não são observadas repulsão de gota

(pequena oscilação da poça e da gota) ou geração de respingos. Um comportamento calmo da poça garante um cordão de acabamento uniforme. A transferência "por ponte" é gerada com fontes no modo corrente constante e/ou com indutância muito alta. Acontece em uma faixa restrita de parâmetros (baixas tensão e corrente). Entretanto, uma vez regulados os parâmetros, esse modo de transferência pode ser usado em, por exemplo, soldagem de chapas muito finas.

Transferência metálica por curto-circuito forçado

Esse modo de transferência é caracterizado pela regulagem dos parâmetros para um arco curto, porém com alta velocidade de alimentação (acima de 10 a 12 m/min), produzindo correntes tão altas como 250 a 350 A. Como a transferência é governada por uma forte ação do efeito *Pinch*, a gotas são de pequeno tamanho e em alta frequência. Como não há tempo para as gotas alcançarem um volume maior, o efeito da tensão superficial é minimizado. Gera-se uma grande quantidade de respingos.

Transferência metálica globular

Este tipo de transferência ocorre quando se utilizam tensões de arco de moderadas a altas (ou seja, arcos longos para evitar curto-circuito) e correntes baixas (forças eletromagnéticas não significativas), caracterizando-se principalmente pela transferência irregular de gotas grandes (maiores que o diâmetro do eletrodo) em frequência muito baixa (1 a 10 gotas/segundo), conforme ilustrado na Figura 2.19. O tamanho, a forma e a posição da gota, assim como a frequência da transferência, dependem, principalmente, do diâmetro e composição do arame-eletrodo, do gás de proteção e da intensidade da corrente de soldagem. Durante a formação (crescimento) e o destacamento da gota, a resistência elétrica no trecho "gota-arco" vai progressivamente se alterando, o que dá um caráter dinâmico bem característico aos sinais de I e U, como também visto na Figura 2.19.

Durante a formação da gota (crescimento), esta permanece no eletrodo devido principalmente à ação combinada das forças de tensão superficial e de vaporização. À medida que o volume da gota se torna

grande o suficiente, o seu peso e, em menor escala, a força eletromagnética (em virtude de a corrente não ser muito alta) e a força de arraste superam as forças contrárias à transferência e causam o destacamento. Este comportamento justifica a baixa taxa de transferência, enquanto a baixa corrente impede alcançar uma alta taxa de deposição do arame (baixa capacidade de produção).

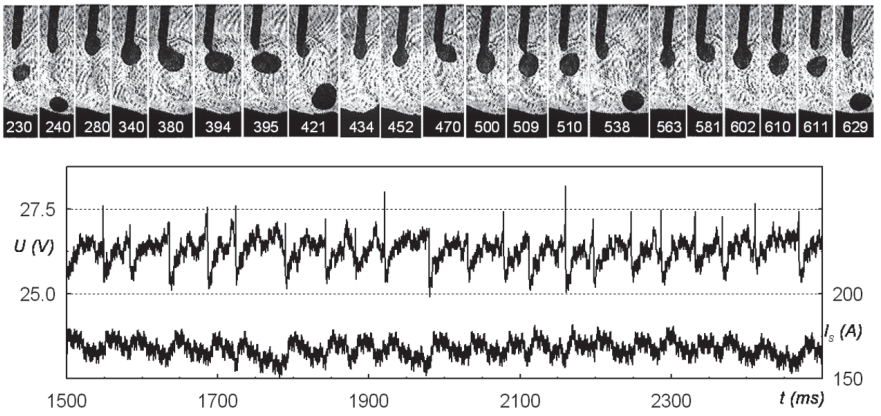


Figura 2.19 – Na vista superior, um exemplo da transferência metálica no modo globular (2000 quadros por segundo); na vista inferior, oscilogramas típicos deste tipo de transferência (gás de proteção Ar + 5%O_2; arame de aço carbono de 1,0 mm de diâmetro; U_a = 28,0 V; V_{alim} de 5,7 m/min; I_s = 164,7 A; V_s de 30 cm/min; *DBCP* de 18 mm)

Pelo fato de a força gravitacional ser dominante neste tipo de transferência metálica, a soldagem é limitada à posição plana. A Figura 2.20 mostra que, na soldagem vertical, as gotas podem cair sem acompanhar o arco. Estas desvantagens e o aspecto irregular do cordão de solda fazem com que este modo de transferência seja pouco desejado e aplicado na soldagem MIG/MAG, com raras exceções, como a soldagem de alumínio de chapas finas (onde há dificuldade de se utilizar o modo curto-circuito e não se tem disponibilidade de usar um modo controlado de transferência, como será visto no Item 2.2.2).

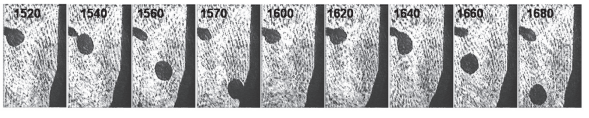


Figura 2.20 – Soldagem MIG/MAG na posição vertical com transferência globular (2000 quadros por segundo; gás de proteção Ar+5%O_2; arame de aço carbono de 1,0 mm de diâmetro; V_{alim} de 5,6 m/min)

Transferência metálica globular repulsiva

Com as mesmas características da transferência globular quanto ao tamanho da gota e à frequência de transferência, o modo globular repulsivo ocorre principalmente em soldagem MIG/MAG em polaridade CC- (o arame-eletrodo como cátodo) ou na soldagem MIG/MAG em polaridade CC+, mas utilizando gases de proteção que favorecem o aumento de forças de reação (Hélio e CO_2 puro, por exemplo). Nestas situações, a gota passa a sofrer uma pressão elevada sobre uma pequena área na sua parte inferior, podendo ser empurrada para cima e desviada de sua trajetória normal (braço de alavanca), conforme ilustrado na Figura 2.21. Uma vez desviada, a gota pode ficar nesta posição por longos períodos. A força de reação contrapõe as forças favoráveis à transferência, de modo que a gota só se destaca quando atinge um grande volume, ou seja, quando a força da gravidade supera a força de reação. As limitações da transferência metálica globular repulsiva são as mesmas que as da transferência metálica globular, porém mais pronunciadas, e, como resultado, este tipo de transferência metálica não é desejado na soldagem MIG/MAG.

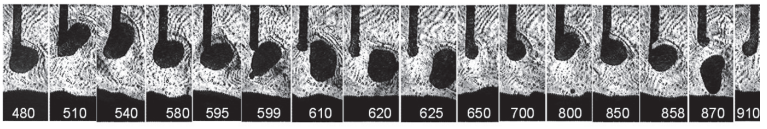


Figura 2.21 – Exemplo da transferência metálica globular repulsiva (2000 quadros por segundo; arame-eletrodo-de aço-carbono de 1,0 mm de diâmetro; U_a = 36,7 V; V_{alim} de 7,0 m/min; I_s = 171,8 A; V_s de 30 cm/min; *DBCP* de 18 mm; gás de proteção CO_2 puro)

Transferência metálica goticular (projetada)

A transferência goticular projetada, mais conhecida pelo inadequado termo inglês "spray" ou "projected spray", ou referenciada em português simplesmente por goticular, é caracterizada pela transferência de pequenas gotas (com o diâmetro próximo ao do eletrodo) de forma sequencial (e não pulverizadas), em alta frequência (veja a Figura 2.22). Por isto, os oscilogramas de corrente e tensão deste tipo de transferência não mostram variações significativas dos sinais. Ocorre normalmente na soldagem MIG/MAG com polaridade CC+, com altas correntes (forças eletro-magnéticas altas) e tensões elevadas (para garantir um arco suficientemente longo, lembrando que a característica estática de arcos MIG/MAG é ascendente, ou seja, para um

mesmo comprimento de arco a tensão tem de ser maior do que quando em correntes baixas) e atmosfera protetora à base de argônio. O campo operacional deste tipo de transferência foi identificado na Figura 2.14.

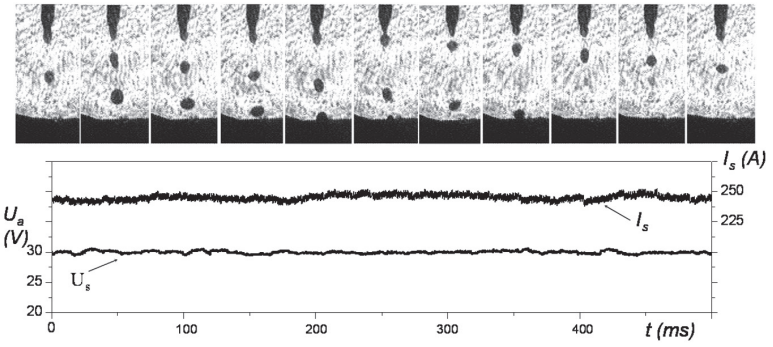


Figura 2.22 – Variações da tensão e da corrente de soldagem em condições da transferência goticular (Fonte eletrônica com *CEF* Tensão Constante; arame-eletrodo aço-carbono de 1,2 mm de diâmetro; U_a de 30 V; V_{alim} de 6 m/min; V_s de 40 cm/min; *DBCP* de 18 mm; gás de proteção Ar+2%CO_2; 2000 quadros por segundo)

Uma condição indispensável para que este modo de transferência possa ocorrer é que a corrente de soldagem ultrapasse um valor crítico, denominado de corrente de transição (Itr). Até a corrente de soldagem alcançar o nível de transição, que na verdade é uma faixa e não um valor único, o tamanho das gotas se reduz lentamente com aumento (também lento) da frequência da transferência (Figura 2.23). Quando a corrente de soldagem excede o nível da Itr, ocorre uma redução significativa e abrupta do tempo da formação da gota até o destacamento, acarretando também um aumento súbito da frequência da transferência das gotas. A razão para isto é a mudança do fenômeno que governa a transferência (de Equilíbrio das Forças Estáticas para Instabilidade Pinch, por exemplo, como explicado no Item 2.1). Nestas condições as gotas não conseguem atingir grandes dimensões, destacando-se em grande frequência (maior do que 200 gotas por segundo). É interessante para um melhor entendimento mostrar imagens da região de acoplamento arco-gota (Figura 2.24); no caso da transferência gotícular, o arco passa a envolver completamente a gota ou, pelo menos, mais que a sua metade, enquanto que, nos modos da transferência por curto-circuito e globular, o arco é confinado à parte inferior da gota.

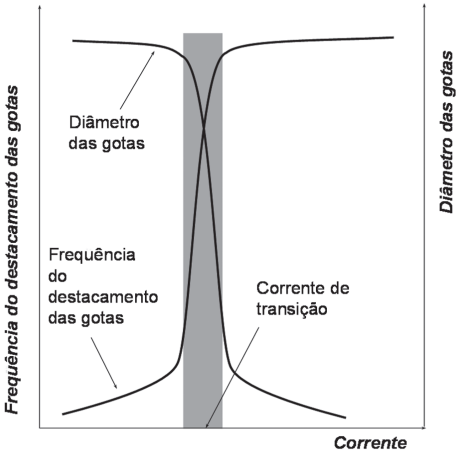


Figura 2.23 – Ilustração esquemática da alteração brusca do comportamento da transferência metálica, a qual caracteriza a corrente de transição

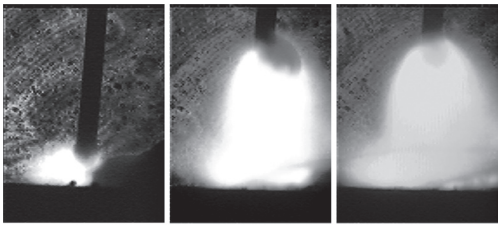


Figura 2.24 – Tamanho e posição da mancha ativa do arco em respeito à gota na transferência por curto-circuito (esquerda), globular (centro) e goticular (direita)

A corrente de transição depende, principalmente, do material e diâmetro do eletrodo, do seu comprimento energizado e do tipo de gás de proteção (Tabela 2.2). Como regra prática, quanto maior a resistividade elétrica, menor ponto de fusão, menor o diâmetro e maior o comprimento energizado, menor é a Itr. O efeito do gás sobre o tipo de transferência já foi discutido no Item 1.8, mas deve-se ter ciência da complexidade deste fenômeno. De uma forma geral, pequenas adições de O_2 em Ar reduzem Itr, fenômeno associado a uma menor tensão superficial originária da reação do O_2 com a superfície da gota. O mesmo efeito deveria ser observado para o aumento do teor de CO_2, mas o comportamento é inverso. Este fato pode se justificar pelo desconhecimento da cinética de reação do CO_2 nas temperaturas no acoplamento do arco-gota, que pode até fazer com que o meio se torne redutor, ou pela formação elevada de vapores que exercem força de repulsão, dificultando a transferência.

Assim, misturas de argônio com baixos teores de oxigênio (o limite prático para utilização de O_2 é de 5%) e CO_2 são os gases de proteção que proporcionam a transferência goticular mais facilmente. À medida que se aumenta o teor de CO_2, a corrente de transição sobe. Mas alcançando teores maiores do que 18-20%, este tipo de transferência é dificilmente observada (o mapa na Figura 2.14 se limita aos campos Globular e Curto-circuito). Normalmente, a corrente da transição é determinada experimentalmente através ensaios com aumento gradual da intensidade de corrente de soldagem..

Tabela 2.2 – Faixas de corrente de transição típicas para diferentes materiais e diâmetros do eletrodo e gases de proteção (lembrar que a faixa de corrente de transição depende de outros fatores operacionais, como a composição e comprimento livre reais do arame)

Material do arame-eletrodo	**Atmosfera protetora**	**Diâmetro de arame-eletrodo, mm**	**Corrente de transição, A**
Aço-carbono	98%Ar + 2%O_2	0,6	130 - 135
		0,8	150 - 160
		0,9	160 -170
		1,0	180 -190
		1,1	210 -230
		1,2	220 -240
		1,6	260 -280
	95%Ar + 5%CO_2	0,8	135 - 145
		1,0	180 - 190
		1,2	230 - 250
		1,6	270 - 285
	92%Ar + 8%CO_2	0,8	145 - 155
		1,0	190 - 200
		1,2	240 - 260
		1,6	280 - 295
	85%Ar + 15%CO_2	0,8	150 - 160
		1,0	195 - 205
		1,2	250 - 270
		1,6	285 - 300
	80%Ar + 20%CO_2	0,8	155 - 165
		1,0	200 - 210
		1,2	265 - 280
		1,6	320 - 345

Aço inoxidável	98%Ar + 2%O_2	0,9	130 - 150
		1,0	160 - 170
		1,1	180 - 200
		1,2	210 – 230
		1,6	260 - 270
Alumínio	Argônio	0,8	90 - 95
		1,0	100 - 110
		1,1	115 - 125
		1,2	130 - 140
		1,6	170 - 180
Cobre desoxidado	Argônio	0,9	180 - 190
		1,1	200 - 210
		1,6	290 - 310
Bronze Silício	Argônio	0,9	160 - 170
		1,1	200 - 210
		1,6	260 - 280

Nitrogênio e hélio também dificultam a transferência goticular. Por exemplo, esta transferência foi observada na soldagem de aços-carbono com misturas ternárias Ar-He-2%O_2 com até 75% de He, não ocorrendo para a mistura He-2%O_2 sem argônio. A utilização de revestimentos emissivos (elementos de baixo potencial de ionização) no arame-eletrodo favorece a transferência goticular, tornando-a possível mesmo para uma proteção de dióxido de carbono ou na soldagem com eletrodo negativo.

Quando se trabalha acima da corrente I_{tr}, as gotas passam a ser arrastadas compulsoriamente da ponta do eletrodo e projetadas (daí a denominação "transferência goticular projetada") com alta velocidade em direção à poça de fusão. A trajetória de seu voo, ao contrário da transferência globular (Figura 2.20), coincide com o eixo do eletrodo, qualquer que seja a inclinação do eletrodo (Fig. 2.25). Desta maneira, a transferência goticular poderia ser empregada em qualquer posição. Entretanto, por demandar correntes altas, o que vai conduzir a altas energias impostas e à criação de uma grande poça de fusão, este tipo de transferência dificulta a soldagem fora da posição plana ou de chapas finas. Assim, a transferência goticular tem como aplicações principais a união e o enchimento de chanfros em chapas mais espessas (normalmente maiores que 3 mm), sendo muito utilizada em caldeirarias pesadas e de construção naval.

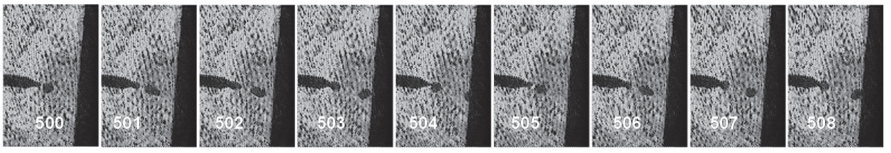


Figura 2.25 – Soldagem MIG com a transferência goticular na posição vertical (2000 quadros por segundo; gás de proteção Ar+ 5%O_2; arame-eletrodo de aço-carbono de 1,0 mm de diâmetro; V_{alim} de 8,7 m/min)

As principais características da transferência goticular são a de apresentar alta taxa de deposição, não gerar respingos, ter bom molhamento e a solda apresentar boa penetração. Os cordões resultantes são de bom aspecto superficial e o ruído é homogêneo. As variações nos sinais elétricos de tensão e de corrente e na intensidade luminosa do arco, provenientes da transferência da gota, também são bastante reduzidas quando comparadas aos dois tipos de transferência já comentados acima.

À medida que a corrente de soldagem é aumentada, a transferência goticular transforma-se na transferência goticular com elongamento e na transferência goticular rotacional, que serão descritas à frente.

Transferência metálica goticular com elongamento

Na transferência goticular projetada, a ponta do eletrodo torna-se afunilada durante a formação das gotas, mas o comprimento deste afunilamento é curto (menor ou igual ao diâmetro do eletrodo; veja a Figura 2.22). Para correntes maiores do que as da transferência goticular projetada (à direita do campo de goticular na Figura 2.14), o arco começa a escalar a superfície do eletrodo, superaquecendo-a e tornando pastoso um comprimento de superfície cilíndrica acima da ponta do mesmo. Assim, com a ajuda das forças eletromagnéticas, a ponta do eletrodo fica "elongada"[26] (como um corpo de prova em ensaio de tração) e pequenas gotas se desprendem em alta frequência, a partir da ponta deste comprimento com elongamento (Figura 2.26).

[26] - O termo "elongamento", apesar de utilização restrita na língua portuguesa, foi escolhido em detrimento de "alongado" ou "afunilado", pois estes individualmente não traduzem o total sentido de crescer e afunilar ao mesmo tempo.

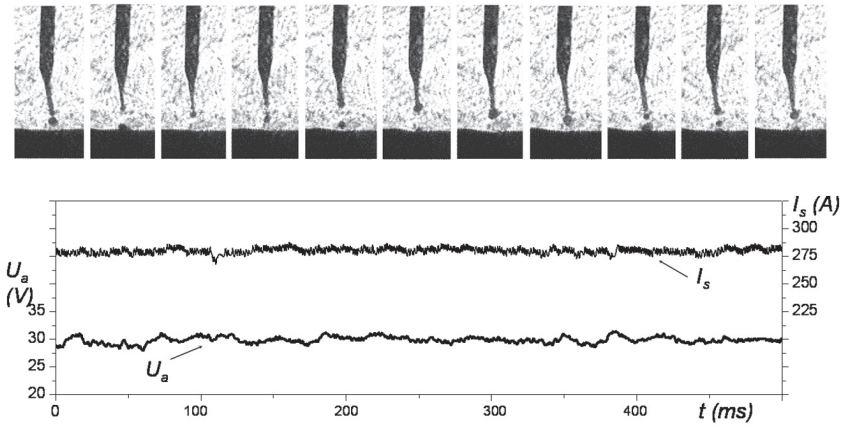


Figura 2.26 – Variações da tensão e da corrente de soldagem em condições da transferência goticular com elongamento (Fonte eletrônica com *CEF* Tensão Constante; arame-eletrodo aço-carbono de 1,2 mm de diâmetro; U_a de 30 V; V_{alim} de 8 m/min; V_s de 40 cm/min; *DBCP* de 18 mm; gás de proteção Ar+2%CO_2, 2000 quadros por segundo)

O elongamento pode atingir comprimentos da ordem de algumas vezes o diâmetro do eletrodo. Desta forma, as gotas são lançadas axialmente da extremidade do elongamento do eletrodo, muito próximas umas das outras, quase formando um jato contínuo. Do ponto de vista de oscilogramas, não se nota diferença para quando soldando com goticular projetada, mas o valor de tensão é um pouco mais alto, pois o filamento líquido pode se tornar longo a ponto de tocar a poça de fusão, causando curtos-circuitos e perturbando a estabilidade do processo. Este tipo de transferência mantém as mesmas características operacionais da transferência goticular projetada e, sem aparelhagem especial, um soldador não consegue visualizar diferenças de comportamento entre este modo e o outro.

Gases com baixa capacidade de troca de calor, como o Ar ou misturas muito ricas em Ar, favorecem este tipo de transferência. Materiais de arames-eletrodo com baixa condutividade térmica são também mais prováveis de assumirem este tipo de transferência, mesmo sob correntes não tão altas. Por exemplo, a soldagem com arame de aço inoxidável austenítico sob atmosfera de Ar com menos de 2% de O_2 dificilmente vai permitir a transferência goticular projetada, já que o elongamento aparece logo após superar a corrente de transição.

Transferência metálica goticular rotacional

Para correntes ainda maiores de que aquelas da transferência goticular com elongamento (à direita do campo de goticular com elongamento na Figura 2.14), uma nova transição ocorre no modo da transferência metálica. A extremidade do eletrodo fica mais superaquecida, aumentando o comprimento da coluna de metal pastoso na ponta do eletrodo. Neste caso, o campo magnético, criado pela alta corrente de soldagem, é capaz de gerar um efeito torsional no elongamento do eletrodo, de maneira que a sua base passa a realizar um movimento rotacional em forma de cone ou mesmo espiral (Figura 2.27). Nestas condições, a transferência não é mais axial; as gotas passam a ser transferidas na direção oblíqua (quase radial) do arco, provocando normalmente uma grande quantidade de respingos finos.

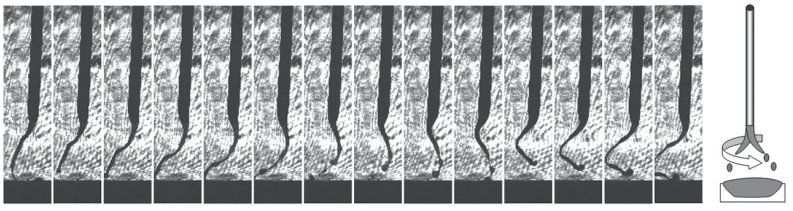


Figura 2.27 – Imagens e representação esquemática da transferência goticular rotacional (Fonte eletrônica com *CEF* Tensão Constante; arame-eletrodo aço-carbono de 1,0 mm de diâmetro; U_a de 38 V; V_{alim} de 20 m/min; I_s de 325 A; V_s de 50 m/min; *DBCP* de 22 mm; gás de proteção Ar+2%O_2; 5000 quadros por segundo)

Transferência metálica por explosão

O modo de transferência por explosão ocorre quando as reações químicas de componentes altamente reativos presentes no eletrodo formam bolhas no interior das gotas em formação, que, superaquecidas e aglomeradas, provocam explosões, desconfigurando a gota durante a transferência (veja a Tabela 2.1). A transferência por explosão usualmente acontece quando são usados arames-eletrodo de ligas de alumínio com magnésio. Este tipo da transferência metálica é, normalmente, acompanhado pela geração excessiva de respingos extremamente finos e de grande geração de fumos.

2.2.2 - Modos controlados de transferência metálica

Os modos naturais de transferência metálica de uma forma geral apresentam limitações quando se requer a otimização de características

operacionais (por exemplo, soldar chapas finas ou fora da posição plana sem grande incidência de respingos). Estas demandas datam do início do processo MIG/MAG, mas a solução só foi possível com o advento de equipamentos mais modernos, que passaram a permitir controlar a transferência metálica. Assim, surgiram os chamados modos controlados de transferência metálica, que são nada mais do que os modos naturais obtidos de uma forma proposital e dominada, seja através da programação de alterações de parâmetros ou através de autorregulagem dos parâmetros via monitoramento de uma das variáveis.

Os exemplos mais comuns de modos controlados de transferência são as transferências pulsada e por curto-circuito controlado. A transferência pulsada é o modo de transferência goticular projetada conseguida pela pulsação da corrente, de tal forma que durante um período de pulso a corrente ultrapassa o valor da corrente de transição para combinação arame-gás de proteção, enquanto durante o período do tempo de base a corrente apenas mantém o arco aberto, sem transferências. Com a regulagem correta dos parâmetros de pulso, consegue-se uma transferência goticular regular (uma gota por pulso), com tamanho de gotas aproximadamente igual a do diâmetro do eletrodo e com corrente média bem abaixo da corrente de transição (permitindo soldar chapas finas e fora da posição plana sem respingos). O processo MIG/MAG pulsado é descrito em maiores detalhes no Item 4.1.1. Já a transferência por curto-circuito controlado é um modo do grupo por contato em que sua ocorrência perde o caráter aleatório, passando à regular em relação ao tempo e com destacamentos mais suaves. Para tal, um sistema de controle adaptativo faz comandar a variação da corrente a partir dos valores de tensão a cada etapa do curto-circuito. Com o modo de curto-circuito controlado se consegue uma operação praticamente sem respingos e um maior controle da poça fundida pela regularidade térmica.

Os modos de transferências controladas são subclassificados de acordo com o parâmetro sujeito ao controle adaptativo (Tabela 2.1). Por exemplo, na Transferência Goticular Controlada por Pulsação de Corrente (CC ou CA), a corrente é automaticamente ajustada pela máquina usando um algoritmo para moldar os períodos de pulso e base. Já na Transferência por Contato Controlada pela Corrente e Alimentação do Arame, não somente a corrente é modulada, mas há também ação sobre

o arame, fazendo-o movimentar de forma reversa durante o período de curto-circuito. A aplicação dos modos de transferência controlada na prática se faz em equipamentos especiais, que muitas vezes recebem nomes patenteados (PulsArc, Interpulso, STT, CMT etc.), pois passam a caracterizar o processo como um todo. No Capítulo 4 se dará maiores detalhes desses processos e aplicações. O número deles cresce a cada ano e o desenvolvimento de novos modos para controlar a transferência metálica não se exaurirá tão cedo.

2.2.3 – Modos intercambiáveis de transferência metálica

Além dos modos clássicos de transferências naturais, definidos no Item 2.2.1, existem algumas outras formas de transferência que não são muito comentadas na literatura corrente, provavelmente pela dificuldade de identificá-las por técnicas normais ou por serem confundidas com instabilidade de transferência ou transição entre dois modos naturais. Neste texto, estas formas de transferência são classificadas como "modos intercambiáveis" e se caracterizam por serem transferências metálicas em que dois ou até mesmo três dos modos naturais tomam lugar durante a soldagem, de forma intercalada, sequencial e repetitiva e sem intervenção do operador, controle do equipamento ou do soldador. Os modos intercambiáveis observados são:

- Curto-circuito–Goticular (projetada ou com elongamento);
- Globular–Goticular (projetada ou com elongamento);
- Globular - Curto-circuito - Goticular com elongamento;
- Goticular projetada - Goticular com elongamento;
- Globular - curto-circuito - goticular com elongamento;
- Outros.

As razões para a existência dos modos intercambiáveis é que alguns modos de transferência modificam tanto o estado energético durante suas ocorrências que criam condições favoráveis para outro modo assumir, mas que a seguir esse não se sustenta pelos parâmetros de regulagem e retorna ao modo original. Os campos de ocorrência dessas transferências se situam entre os campos dos modos tradicionais, mas mesmo assim não devem ser confundidos com transição de modos (na região de intercessão dos modos

naturais), tanto pelos fundamentos para sua ocorrência, como pela falta de sequencialidade e repetitividade com que estes últimos se caracterizam (a transição é um fenômeno de instabilidade entre dois modos, de fundo ocasional e não circunstancial). O modo de transferência na classe intercambiável, por sua vez, acontece quando condições concorrentes se alinham, ou seja, quando há combinações de corrente, comprimento de arco, material e diâmetro do arame-eletrodo e material de base, gás de proteção, distância bico de contato-peça e comportamento dinâmico da fonte de energia (indutância) favoráveis (denominadas neste texto daqui para frente de condições propícias). Ou seja, numa região de intercessão dos modos naturais não pode ocorrer os modos intercambiáveis se não houver as condições propícias.

Torna-se importante aqui tecer alguns esclarecimentos sobre essas condições propícias. Quando elas se estabelecem, fazem com que a corrente instantânea aumente seu valor além do da corrente de transição, de forma progressiva, mudando o modo de transferência atuante. Após um breve período, esta corrente decai e o modo de transferência retorna coerentemente ao prévio, iniciando um novo ciclo. Acredita-se haver duas razões para estas variações transitórias e cíclicas de a corrente acontecerem (sozinhas ou acumulativamente). A primeira está relacionada com a ocorrência de curto-circuito. Dependendo principalmente da indutância da fonte (resposta dinâmica da corrente) e do par eletrodo-gás de proteção (valor da corrente de transição e do tempo de duração do curto para que a corrente cresça), a alta corrente que se mantém temporariamente após o final de um curto-circuito (ver Figuras 2.15 até 2.18) pode fazer com que a transferência passe a ocorrer pelo modo goticular projetada ou até goticular com elongamento. Neste momento, a taxa de fusão está bem maior do que a velocidade de alimentação e o comprimento de arco passa a aumentar progressivamente. Como maiores arcos fazem a corrente decrescer em fontes no modo tensão constante, a taxa de fusão vai aos poucos decrescendo até atingir o equilíbrio e, em seguida, a ponta do arame com a gota volta a se aproximar da poça. Com menores correntes e menores arcos se criam as condições para a transferência por curto-circuito e o ciclo se reinicia. Esta razão é a predominante para justificar a ocorrência do modo "Curto-circuito–Goticular" (Figura 2.28).

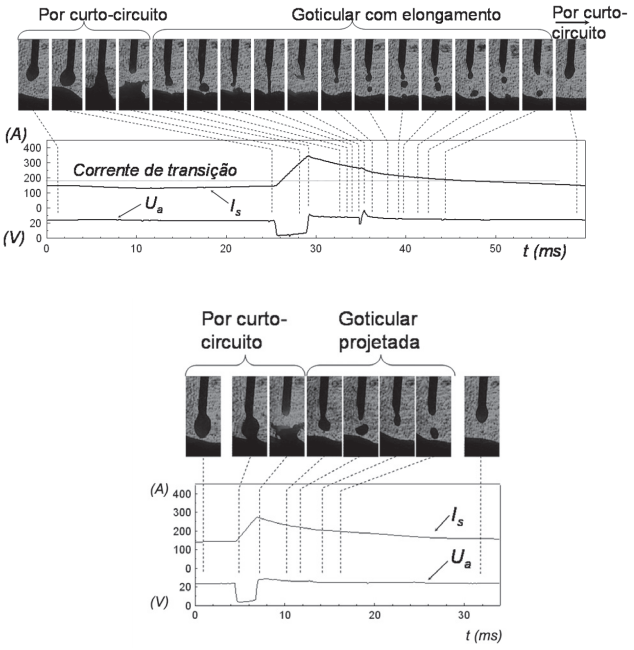


Figura 2.28 – Exemplos de transferência combinada do tipo "curto-circuito–goticular": acima com "elongamento" e abaixo "projetada" (arame-eletrodo de aço-carbono; 1,0 mm de diâmetro; U_a = 23,5 V; I_s = 170 A; V_{alim} = 7 m/min; V_s = 36 cm/min; *DBCP* de 18 mm; gás de proteção Ar + 5%O_2). Para enfatizar o fenômeno, a regulagem da tensão foi intencionalmente maior do que o normal, com elevada taxa de subida e baixa taxa de descida de corrente

A segunda razão está relacionada com um fenômeno ainda não discutido mais abertamente na literatura, mesmo moderna. Os autores deste livro têm evidências de que a resistividade elétrica da gota torna-se maior do que a do arco em soldagens com arames de aço-carbono quando o teor de CO_2 na mistura de gás de proteção é abaixo de 10 a 12% (ver Item 6.2.2). Assim, durante uma transferência globular, à medida que a gota vai crescendo e, consequentemente, o arco vai se reduzindo, a tensão demandada cresce ao invés de se reduzir. Como maior tensão demandada pela solda faz diminuir a corrente em fontes do tipo tensão constante (em gradiente imposto pela indutância), a taxa de fusão do arame torna-se menor do que a velocidade de alimentação do arame-eletrodo. Então, a ponta do arame (com uma gota globular) se aproxima da poça sem tocá-la, mas às vezes gerando curtos-circuitos incipientes com correntes de curto-circuito tão insignificantes em tempo e/ou amplitude que não afetariam o fenômeno. No momento de aproximação, a resistência elétrica se reduz,

prevalecendo a resistência ao longo do arame (menor) sobre a da coluna de arco e a corrente volta a crescer, podendo alcançar, também em função da indutância, valores acima do de transição (que é baixa para esses gases), levando à transferência goticular projetada ou até com elongamento. A maior taxa de fusão agora alcançada faz o arco crescer e a corrente decair, condicionando novamente a transferência globular. E um novo ciclo se estabelece. Esta segunda razão justifica o modo "Globular–Goticular" acontecer (Figuras 2.29 e 2.30).

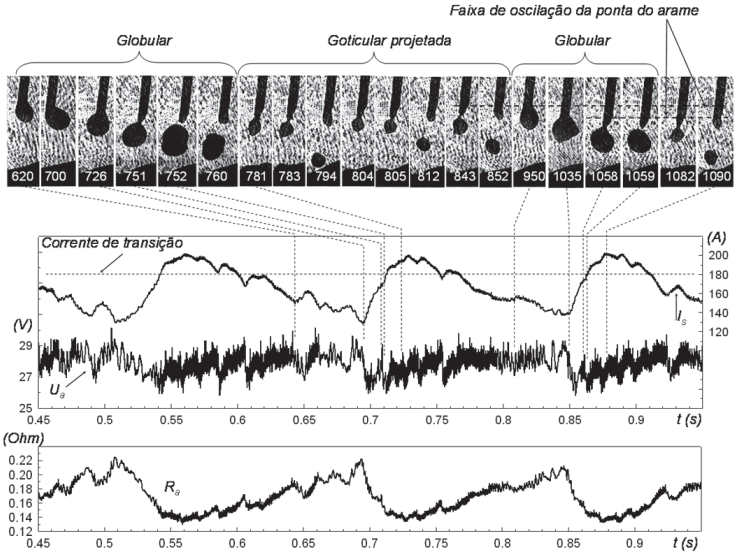


Figura 2.29 – Exemplo de transferência intercambiável Globular-goticular (Fonte eletrônica com CEF Tensão Constante; arame-eletrodo aço-carbono de 1,0 mm de diâmetro; U_a =27,9 V; V_{alim} de 6,3 m/min; I_s = 166,3 A; V_s de 30 cm/min; DBCP de 18 mm; gás de proteção Ar + 5%O_2; 2000 quadros por segundo); nota-se que a corrente e a resistência do arco (R_a) são concorrentes, sendo que a segunda controla a primeira

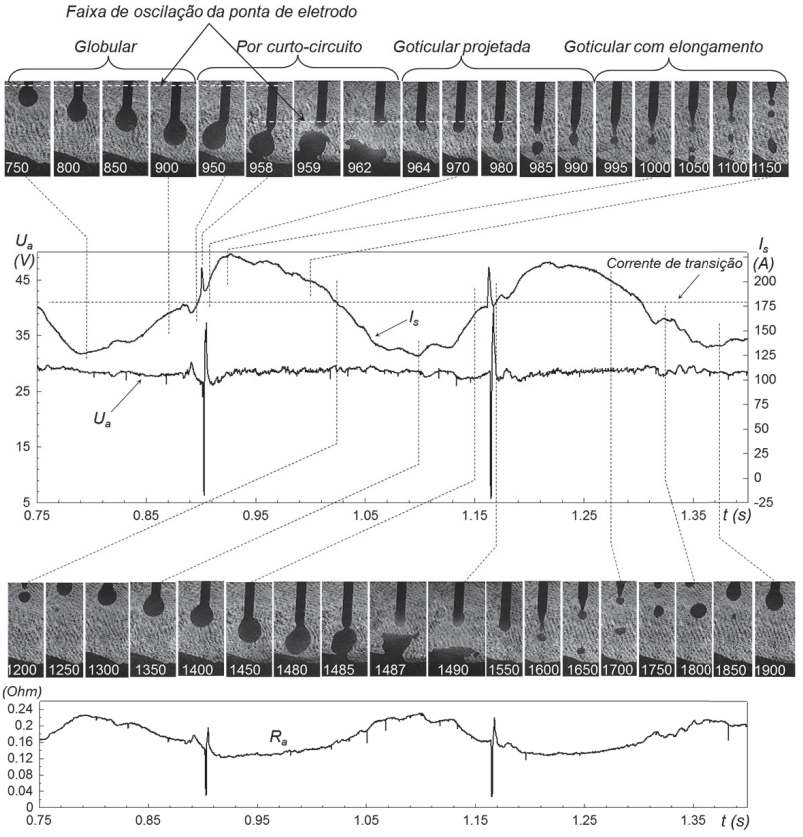


Figura 2.30 – Exemplo de transferência metálica "Globular–Goticular" com curtos-circuitos incipientes (Fonte eletrônica com CEF Tensão Constante; arame-eletrodo aço-carbono de 1,0 mm de diâmetro; U_a de 28,4 V; V_{alim} de 6,5 m/min; I_s = 176,6 A; V_s de 36 cm/min; DBCP de 18 mm; gás de proteção Ar + 2%O_2; 2000 quadros por segundo) - notar tranferências na sequência globular--projetada com elongamento-projetada-globular, de acordo com o comportamento da corrente

Já a Figura 2.31 ilustra a ocorrência do modo intercambiável de transferência "Globular-Curto-circuito-Goticular com elongamento". Neste caso, acredita-se que as duas razões até o momento apontadas agem ao mesmo tempo. No momento de aproximação, entre os quadros 900 até 1028, a segunda razão prevalece, mas o crescimento da corrente não foi suficiente para superar a transição globular-goticular. Mas como houve o curto-circuito, o transição de modo tornou-se possível graças à corrente pós curto-circuito (razão 1).

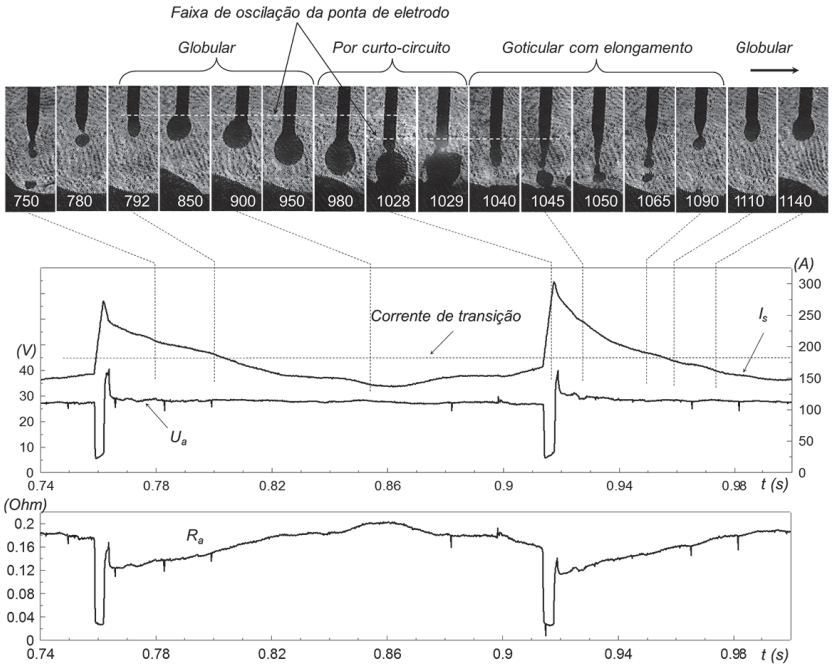


Figura 2.31 – Exemplo da transferência intercambiável "Globular-Curto-circuito-Goticular com elongamento" (Fonte eletrônica com CEF Tensão Constante, arame-eletrodo aço carbono de 1,0 mm de diâmetro; U_a de 27,5 V; V_{alim} de 6,5 m/min; I_s de 168,6 A; V_s de 36 cm/min; DBCP de 18 mm; gás de proteção Ar + 2%O_2; 2000 quadros por segundo) - notar que a redução da tensão de soldagem em relação ao caso da Figura 2.30 foi uma das condições propícias para este modo acontecer

Existem ainda condições energéticas menos estudadas que podem fazer a corrente variar periodicamente e até fazer mudanças cíclicas entre os modos goticulares projetada e com elongamento, que caracterizam o modo intercambiável "Goticular projetada-Goticular com elongamento" (Figura 2.32). Por exemplo, pode-se supor que uma geração intensiva de vapor metálico num arco durante transferência goticular com elongamento alteraria as propriedades do plasma de tal modo a fazer a corrente cair. Assim, a transferência viraria goticular projetada, com menos geração de vapor, o que faria a corrente aumentar novamente. E assim por diante.

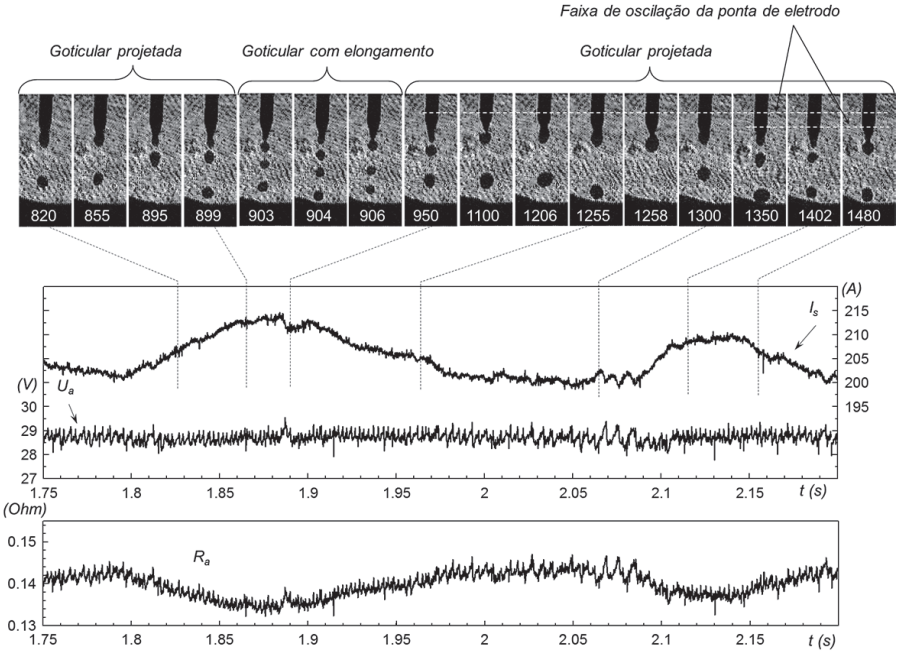


Figura 2.32 - Exemplo de transferência intercambiável "goticular projetada – goticular com elongamento" (fonte eletrônica com CEF Tensão Constante; arame-eletrodo aço-carbono de 1,0 mm de diâme-tro; U_a de 28,7 V; V_{alim} de 8,7 m/min; I_s de 207,0 A; V_s de 36 cm/min; DBCP de 18 mm; gás de proteção Ar + 2%O_2; 2000 quadros por segundo)

É importante ressaltar que hipoteticamente deveria haver uma terceira razão para a transferência intercambiável "Globular-Goticular" se estabelecer quando do uso de gás de proteção à base de Ar com mais de 12% de CO_2 (agora a resistência específica da coluna é maior do que a da gota). Durante uma transferência globular, à medida que a gota vai crescendo e, consequentemente, o arco vai se reduzindo, a tensão demandada diminui coerentemente, fazendo aumentar a corrente em fontes do tipo tensão constante. Assim, se a corrente extrapolasse o valor da de transição, haveria transferência goticular e, de forma similar, a maior taxa de fusão no momento alcançada faria o arco crescer e a corrente diminuir, voltando novamente a transferência globular. E um novo ciclo se estabeleceria. Entretanto, como quanto maior o teor de CO_2 numa mistura maior se torna a corrente de transição, e dificilmente ela seria superada. Por isto, é difícil observar o modo intercambiável de transferência quando se usa misturas de Ar muito ricas em CO_2.

Finalmente, os autores deste livro consideram que os modos intercambiáveis, dificilmente identificados pelos soldadores/operadores, mas por provocar perturbações do processo (respingos, má formação do cordão e outras) devam ser evitados. Para tal, a dinâmica da fonte, fator governante do fenômeno[27], não deve ser excessiva (taxas de subida e descida de corrente não altas demais), permitindo inclusive o uso de gases de proteção à base de Ar com baixo teor de CO_2 sem causar estas perturbações (ver Item 6.2).

Caso persistam as perturbações, os usuários terão de recorrer aos centros de pesquisa com capacidade para técnicas mais avançadas de visualização de arco, para identificar o envelope de trabalho adequado para condições particulares, permitindo otimizar o processo de soldagem e, em especial, evitar os modos intercambiáveis de transferências. Felizmente, a transferência globular, que é, na maioria dos casos, o "ponto inicial" para gerar transferências intercambiáveis, não é largamente usada na prática (existem poucas referências na literatura do uso dela nas soldagens de chapas muito finas ou para passe de raiz). A transferência globular é particularmente aplicada na soldagem de alumínio, onde o problema de transferência intercambiável não tem razões para acontecer. Porém, a transferência globular acontece durante a regulagem dos parâmetros para se obter transferência goticular, ao começar da regulagem da corrente partindo-se de níveis mais baixos.

No caso de usar um gás de proteção com baixo teor de CO_2, a transferência intercambiável do tipo "Globular–Goticular" pode se manifestar (Figura 2.33), o que não é observado caso a mixtura de gás de proteção tenha teor de CO_2 acima de 12 a 15% (Figura 2.34). Este fenômeno é explicado em maiores detalhes no Item 6.2.2.

[27] - Levando em consideração que o controle da indutância é o "remédio" mais efetivo contra a ocorrência da transferência intercambiável, informações sobre este tipo de transferência metálica tornam-se de extrema importância, especialmente para fabricantes de equipamentos de soldagem.

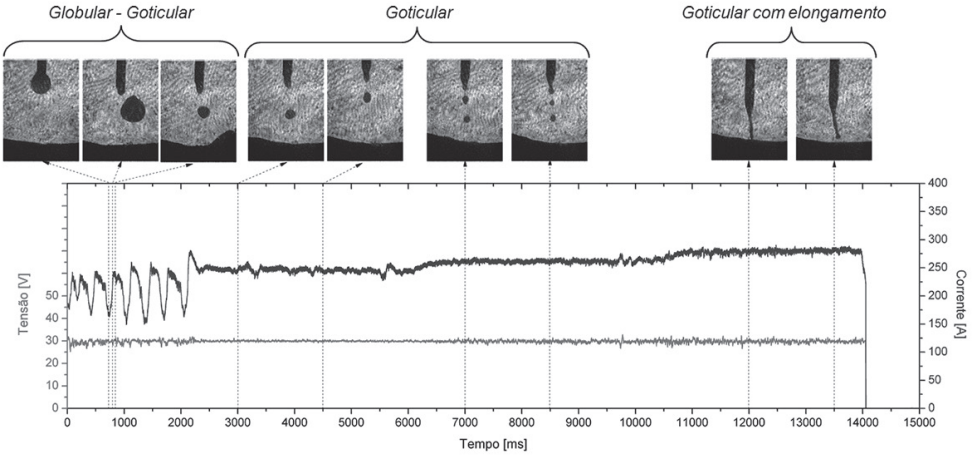


Figura 2.33 – Peculiaridades da transição dos modos da transferência metálica no caso do uso uma mixtura de gás de proteção com um teor baixo de CO_2 (fonte eletrônica com *CEF* Tensão Constante; arame-eletrodo aço-carbono de 1,2 mm de diâmetro; U_a de 32 V; V_{alim} foi variado de 5 a 8 m/min; V_s de 40 cm/min; *DBCP* de 18 mm; gás de proteção Ar+2%CO_2)

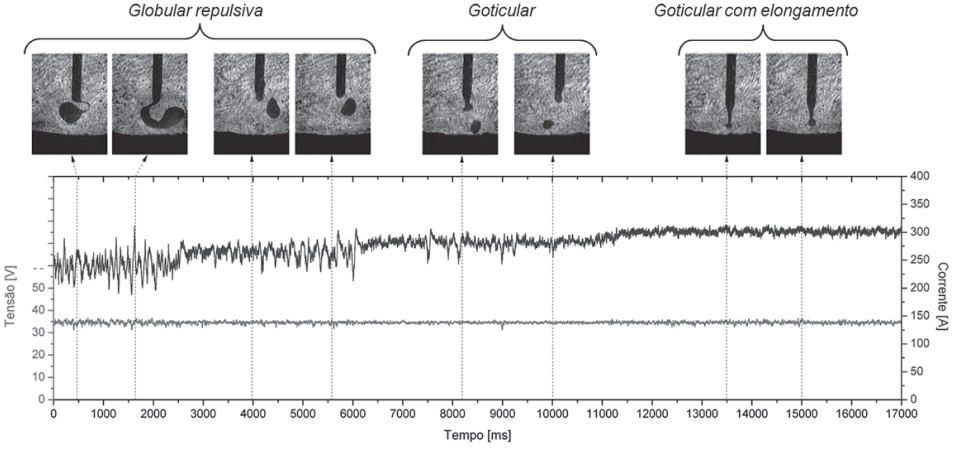


Figura 2.34 – Peculiaridades da transição dos modos da transferência metálica no caso do uso uma mixtura de gás de proteção com um teor alto de CO_2 (fonte eletrônica com *CEF* Tensão Constante; arame-eletrodo aço-carbono de 1,2 mm de diâmetro; U_a de 37 V; V_{alim} foi variado de 6 a 9 m/min; V_s de 40 cm/min; *DBCP* de 18 mm; gás de proteção Ar+15%CO_2)

2.3 – Bibliografia para o Capítulo 2 (referenciada e para leitura complementar)

Neste item é apresentada uma lista de materiais bibliográficos, dos quais foram tiradas informações e/ou que tratam do assunto com maiores detalhes (alguns foram citados, como referência, ao longo do texto).

Bálsamo, P. S. S., Vilarinho, L. O., Vilela, M. & Scotti, A.; *Development of an experimental technique for studying metal transfer in welding: synchronized shadowgraphy*, In: Int. J. for the Joining of Materials, vol. 12, nº. 1, 2000, The European Institute for the Joining of Materials (JOM), Denmark, pp. 1-12 (ISSN 0905-6866).

Dilthey, U. & Woeste, K., *Increased productivity by improved arc and beam welding*. Int. Conf. on the Joining of Materials - JOM-14, Helsingor, Denmark, 2007.

Miranda, H. C.; Ponomarev, V.; & Ferraresi, V. A. & Scotti, A. *Avaliação do controle da transferência metálica por meio de pausas de corrente na soldagem MAG por curto-circuito*. XVI Cobem - Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 26 a 30 de novembro de 2001, Uberlândia, MG. ABCM. CD rom, vol. 18, p.70-76.

Miranda, H. C.; Ponomarev, V.; Ferraresi, V. A. & Scotti, A.; *Controle da transferência metálica por meio de ajuste dos parâmetros de uma fonte eletrônica*, Anais do XVI Cobem - Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 26 a 30 de novembro de 2001, Uberlândia, MG. ABCM. CD Rom, vol. 18, p.77-85.

Norrish, J., *A review of metal transfer classification in arc welding*, IIW Doc XII-1769-03.

Ponomarev, V., Scotti, A, *Mechanism of the free-flight metal transfer mixed mode in the MIG/MAG welding provoked by inadequate dynamic characteristics of the power source*, IIW/IIS 55th Annual Assembly, WG-212, Denmark, Copenhagen, 2002, 23 to 28 June, IIW Doc. 212-1028-02, 6 p.

Ponomarev, V.; Miranda, H. C.; Ferraresi, V. A. & Scotti, A., *Optimization of MAG-CO_2 welding metal short-circuiting metal transfer*, In: Int. J. for the Joining of Materials, vol. 16, nº. 2, Jun. 2004, Institute the for Joining of Materials (JOM), Denmark, pp. 43-48 (ISSN 0905-6866).

Ponomarev, V.; Scotti, A., *Investigation of the mechanism of long arc MIG/MAG welding metal transfer mixed modes provoked by inadequate dynamic features of the power source*. In: Int. Journal for the Joining of Materials, vol. 16, nº. 3, Sep. 2004, Institute the for Joining of Materials (JOM), Denmark, pp. 71-77 (ISSN 0905-6866).

Ponomarev, V.; Scotti, A., Miranda, H. C., Costa, A. V.; *Investigation of the mechanism of short arc MIG/MAG welding metal transfer mixed modes*, In: Int. J. for the Joining of Materials, vol. 16, nº. 3, Sep. 2004, Institute for the Joining of Materials (JOM), Denmark, pp. 65-70 (ISSN 0905-6866).

Ponomarev, V.; Scotti, A., Slivinskiy, A., *MIG/MAG welding metal transfer modes atlas*. In: Int. Journal for the Joining of Materials, vol. 16, nº. 4, Dec. 2004, Institute the for Joining of Materials (JOM), Denmark, pp. 103-107(ISSN 0905-6866).

Ponomarev, V.; Scotti, A.; Miranda, H. C. & Costa, A. V.; *Influence of the power source dynamic characteristics on the metal transfer mixed mode*, IIW/IIS 55th Annual Assembly, WG-212, Denmark, Copenhagen, 2002, 23 to 28 June, IIW Doc. 212-1014-02, 13 p.

Scotti, A.; *A review on special metal transfer modes in GMAW*, Rev. Bras. de Ciências Mecânicas - RBCM, ABCM, vol. XX, nº. 3, Set. 1988, pp. 465-478. (ISSN 0100-7386).

Scotti, A., *Mapping the transfer modes for stainless steel GMAW*, J. of Science and Technology of Welding and Joining, Institute of Materials Publ., UK, vol.5, nº. 4, 2000, pp. 227-234 (ISSN 1362-1718).

Scotti, A., Ponomarev, V., Lucas, W.; *A Scientific Application Oriented Classification for Metal Transfer Modes in GMA Welding*, Journal of Materials Processing Technology, 212 (6), Jun 2012, pp. 1406-1413, doi:10.1016/j.jmatprotec.2012.01.021.

Simpson, S. W. & Zhu, P., *Formation of molten droplets at a consumable anode in an electric welding arc*, J. Phys. D: Appl. Phys. 28 (1995) 1594-1600.

5 - Processos MIG/MAG modernos com aumento de produção

Com a demanda pelo aumento da produtividade num mercado cada vez mais competitivo, o processo MIG/MAG convencional começa a não atender mais plenamente às necessidades das indústrias no que diz respeito à produtividade; procuram-se taxas de deposição mais elevadas, possibilitando a redução do tempo de soldagem e, consequentemente, custos globais. Como se sabe, o aumento simples do diâmetro do eletrodo, para possibilitar a imposição de correntes ainda maiores (maior taxa de produção), esbarra não só na perda da facilidade de manuseio da tocha (rigidez mecânica e peso), mas principalmente na impossibilidade de se trabalhar com estabilidade de arco (a transferência passa a ser goticular rotacional, como visto no Item 2.2.1). Assim, duas abordagens para alcançar o objetivo de colocar o processo MIG/MAG também na escala de alta produção têm sido adotadas pelos fabricantes de equipamentos, a saber, a duplicação do processo (duplicando o número de arames) e a associação de processos (os chamados processos híbridos). Neste capítulo serão descritos os principais aspectos dos processos resultantes comercialmente da aplicação dessas abordagens.

5.1 – MIG/MAG Duplo Arame

Esta variante do processo MIG/MAG baseia-se na formação de dois arcos elétricos por dois arames-eletrodo continuamente alimentados (Figura 5.1). A poça de fusão é protegida da mesma forma que na soldagem MIG/MAG convencional por um fluxo de gás inerte, ativo ou uma mistura de ambos. A utilização de altas densidades de corrente em cada arame é responsável pelas elevadas taxas de fusão absolutas conseguidas e, consequentemente, por cordões mais volumosos; a possibilidade de aumento da velocidade de

soldagem em soldas de passe único ou a redução no número de passes pelo aumento do volume do cordão garante um menor tempo de soldagem.

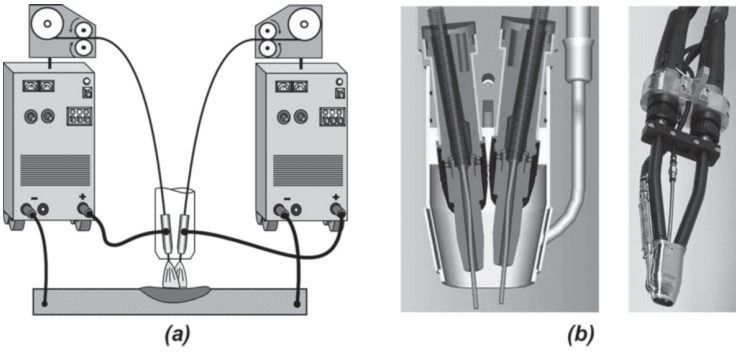


Figura 5.1 – Representação esquemática do processo MIG/MAG Duplo Arame: (*a*) montagem com fontes ligadas em potencial separado; (b) tochas típicas usadas no processo

A energização dos dois arames-eletrodo é feita por duas fontes independentes (potencial separado). Como dois alimentadores de arame-eletrodo são utilizados, pode-se usar diferentes diâmetros e composições químicas de arames e obter velocidades de alimentação distintas. Como duas fontes são utilizadas para comandar os dois alimentadores, diferentes parâmetros elétricos podem ser impostos sobre cada arame. Também se faculta variar a disposição (posicionamento) relativa das pontas dos arames em relação à peça, ou seja, *disposição em paralelo* e *em série*.

Assim, além da maior capacidade de produção, sobressai desta versão do MIG/MAG um melhor controle da geometria do cordão de solda, através do posicionamento da tocha (ângulos), da regulagem independente dos comprimentos de arco e velocidades de alimentação (ou da corrente) em cada arame. Mantém ainda outras vantagens intrínsecas ao processo MIG/MAG convencional, como extrema versatilidade e ampla faixa de aplicações, excelentes características para robotização e pouca produção de escória.

Algumas limitações genéricas são a maior complexidade operacional (regulagem de parâmetros, pois, além de multiplicados, ainda não se conhece bem como é a interação entre os dois arcos), taxas de fusão ainda assim limitadas (devido principalmente a transferências metálicas instáveis e à capacidade mecânica da tocha para correntes muito elevadas), o custo elevado da tocha e equipamentos e a menor acessibilidade e grau de liberdade das tochas (dificultando operações semiautomáticas). Uma outra limitaçao é o fato do espaçamento entre os arames ser dependente da distância bico de contato-

-peca (DBCP) nas tochas em que os arames não são paralelos, como indica a Figura 5.2, o que exige um rigoroso controle da DBCP durante as soldagens. A deflexão magnética entre os arcos[32], em particular, tem sido apontada como um grande entrave operacional do processo, por atrair entre si os arcos e gotas em transferência, como ilustrado pela Figura 5.3. Entretanto, como se verá ao longo deste texto, desde que se trabalhe com tochas e regulagem adequadas de parâmetros (sobretudo corrente e comprimento de arco), as deficiências provocadas pela deflexão magnética são superadas.

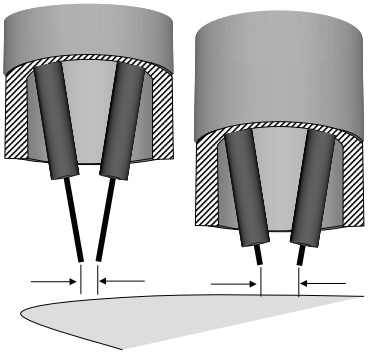


Figura 5.2 – Representação esquemática mostrando como a distância entre arames muda em função da *DBCP*

Figura 5.3 – Efeito da deflexão magnética sobre os arcos (a) e sobre as gotas em transferência (b)

5.1.1 – Influência das variáveis do processo

Quanto mais conhecido é o processo de soldagem, mais fácil se torna para o engenheiro de soldagem prever o efeito esperado da regulagem das variáveis sobre o cordão resultante. O comportamento de muitas destas variáveis, como corrente, pode até ser extrapolado para outros processos similares. Entretanto, devido ao caráter inovador do processo MIG/MAG

Duplo Arame e ao grande número de novas variáveis, um melhor aproveitamento do processo passa pelo reconhecimento dos efeitos de suas principais variáveis, tais como:

- Alinhamento dos arames-eletrodo em relação ao cordão de solda (sequencial ou transversal);
- Gás de proteção;
- Transferência metálica;
- Distância bico de contato-peça (*DBCP*);
- Uso de corrente pulsada;
- Velocidade de alimentação (ou nível de corrente);
- Velocidade de soldagem;
- Ângulo de ataque;
- Diâmetros dos arames-eletrodo.

Seguem algumas informações sobre cada uma dessas variáveis para direcionar o leitor aos seus principais aspectos. O domínio sobre estas vai demandar ao engenheiro de soldagem um pouco mais de informação e experiência.

Alinhamento dos eletrodos em relação ao cordão de solda

Os arames na soldagem MIG/MAG Duplo Arame podem estar alinhados (dispostos) em relação ao cordão de solda, um paralelo ao outro (alinhamento transversal) ou um atrás do outro (alinhamento sequencial ou, também chamado, em série), como esquematizado pela Figura 5.4. A utilização do alinhamento transversal é bastante comum na soldagem de revestimentos, como ilustrado pela Figura 5.5, pois o calor é homogeneamente distribuído pela largura da poça (pequena penetração com uma baixa diluição, características desejáveis nesta aplicação). Porém, também pode ser encontrada na soldagem de união (maior molhabilidade nas bordas, consequentemente, maior largura e menor convexidade, assim como permitindo soldagem de juntas mal-ajustadas ou com grande abertura de raiz). Em se fixando os mesmos parâmetros de soldagem, a mudança de alinhamento transversal para sequencial garante maiores penetrações (maior concentração de calor no centro da junta), o que é visto como vantajoso

para o preenchimento de juntas de topo e filete, como ilustrado pela Figura 5.6. Como solução intermediária entre a maior penetração do alinhamento sequencial e uma maior largura do alinhamento transversal vem a proposta do alinhamento em diagonal. Esta situação poderia ser interessante em juntas sobrepostas, pois o arame-eletrodo líder atuaria sobre o lado da chapa superior (maior capacidade de absorção de calor).

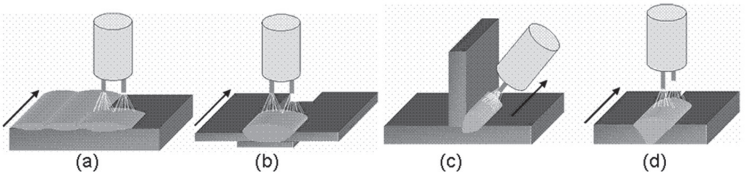


Figura 5.4 – (a) disposição paralelo para revestimento; (b) disposição paralelo para soldagem em chanfros; (c) disposição em série para juntas em ângulo; (d) disposição em série para soldagem em chanfros

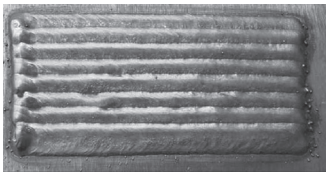
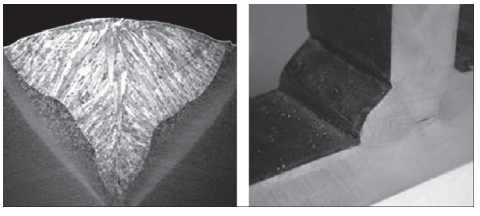


Figura 5.5 – Soldagem de chapa de aço carbono de 12 mm de espessura na posição sobrecabeça, utilizando tocha potencial separada com arames posicionados em paralelo (alinhamento transversal)



(a) **(b)**

Figura 5.6 – Soldagem utilizando alinhamento sequencial: (a) junta de topo; (b) junta em ângulo

Gás de proteção

Na soldagem com duplo arame, o desempenho dos gases de proteção é parecido com o do processo utilizado no arame simples (ver Item 1.8). Entretanto, para aços carbono, CO_2 puro não é aconselhável, pois reduz a taxa de deposição (maior apelo desta versão de processo) sensivelmente (em mais de 40%), isto pela grande incidência de respingos que acontece quando da

proteção por este gás (não se pode comparar este valor com os do caso do arame simples, pois agora há a interação dos dois arcos). Misturas de Ar com mais de 18% de CO_2 têm sido recomendadas especialmente para chapas mais grossas, sob o argumento de um aumento da penetração lateral no perfil do cordão soldado, evitando assim perfis com formato de cálice. Mas com este nível de CO_2 em mistura com Ar, o efeito de gotas repelidas ainda dificulta a operação (novamente alto nível de respingos). Além disto, tem sido observado que velocidades de soldagem acima de 2 m/min são mais difíceis de serem alcançadas com gases de alto teor de CO_2, pois com tal velocidade a poça de fusão tornou-se mais viscosa.

Por isto, o mais aconselhado é utilizar misturas binárias de Ar com até 10% CO_2 ou ternárias de Ar até 5% de CO_2 e até 2% de O_2. Ar puro é empregado em soldagem de alumínio e suas ligas e se recomenda usar Ar+2%O_2 nas soldagens de aços inoxidáveis.

Quanto à vazão do gás de proteção, vai depender do projeto da tocha, mas situa-se de 30 a 40 l/min. Este número alto pode assustar o usuário preocupado com os custos de material de consumo do processo produtivo. Mas é importante lembrar que com o processo duplo arame pode-se fazer a mesma soldagem em muito menor tempo, o que significa menor volume gasto de gás ao final do processo.

Transferência metálica

No processo MIG/MAG, o modo de transferência metálica atuante pode ser influenciado por vários fatores, principalmente por aqueles relacionados com a intensidade de corrente, o comprimento do arco, a composição do gás e o diâmetro, comprimento e material do eletrodo. Especialmente no processo duplo arame, há ainda a influência dos campos eletromagnéticos formados em cada arame. Tanto em potencial único ou em potencial separado, pode-se obter os três modos conhecidos de transferência metálica (Globular, Curto-circuito e Goticular, como visto no Item 2.2), mas a experiência mostra que, para alcançar maiores velocidades de soldagem, quanto mais curto o arco (transferência por curto-circuito), melhor. Colocando em balanço o aspecto visual e os níveis de respingos, aconselha-se a regular o comprimento de cada arco para conseguir a transferência goticular, mas de tal forma que a ponta do arame fique apenas um

pouco acima da poça de fusão. Na verdade, devido às altas correntes empregadas em cada arame e ao gás de proteção com relativamente baixo teor de CO_2, chega-se a operar no modo goticular rotacional, porém, contendo um baixo nível de respingos devido ao curto comprimento de arco.

Distância bico de contato-peça

Composta da extensão livre do eletrodo (distância do bico de contato ao arco) e do comprimento do arco, a distância bico de contato-peça (*DBCP*) afeta o modo de transferência metálica, principalmente pela alteração da quantidade de aquecimento ôhmico ocorrendo no eletrodo. O efeito da *DBCP* em soldagens MIG/MAG com um único arame é razoavelmente conhecido; caso se deseje alta produção e pouca penetração, deve-se procurar *DBCP* longas. Espera-se um comportamento parecido para o processo MIG/MAG Duplo Arame. Quando a distância do bico de contato-peça aumenta para uma dada tensão e velocidade de alimentação reguladas, há uma redução da corrente no circuito. Mas, como ocorre também um aumento do comprimento do eletrodo, resultando em mais aquecimento ôhmico, preaquecendo-o, a sua taxa de fusão permanece inalterada, obtendo-se a mesma produção com menor corrente (não demandando fontes com potência nominal tão altas). De qualquer forma, como o objetivo deste processo é aumentar a produção, deve-se usar *DBCP* longos. Mas, como as correntes são muito altas, não se deve usar *DBCP* extremante longos, devido ao efeito Joule. Por isto, recomenda-se trabalhar com 20 a 25 mm.

O uso de corrente pulsada

Como visto no Item 4.1.1, a corrente pulsada é utilizada no MIG/MAG para controlar a transferência. No MIG/MAG Duplo Arame, o objetivo principal é a minimização da deflexão magnética pela possibilidade de defasar os pulsos de corrente entre cada arame como mostra a Figura 5.7 (baixa corrente média), quando a corrente pulsa no arame líder, o arame seguidor está na corrente de base, reduzindo a intensidade de campo magnético. Esta figura mostra ainda que realmente há uma redução da deflexão magnética dos arcos. Para conseguir esta defasagem, as fontes têm de ser interligadas e dedicadas ao processo (alto custo). Porém, o processo MIG/MAG Duplo Arame parece ser somente viável ao trabalhar com altas correntes médias em cada arame (de 250 a 500 A). Nestes casos, a corrente de base tem de ficar

acima da corrente de transição, fato que, além de inviabilizar a formação de uma gota por pulso (atrativo do MIG Pulsado), torna-se alta suficientemente, não evitando a deflexão magnética, como mostra a Figura 5.8. Além disto, as tochas modernas mantêm uma maior distância entre os arames, de 10 a 25 mm, contra os 5 a 6 mm das tochas originais (mais compactas). Estas são razões, aliadas à necessidade de arcos curtos, para nos dias de hoje já existirem sistemas de soldagem com duplo arame com duas fontes operando no modo tensão constante (mais simples e econômicas).

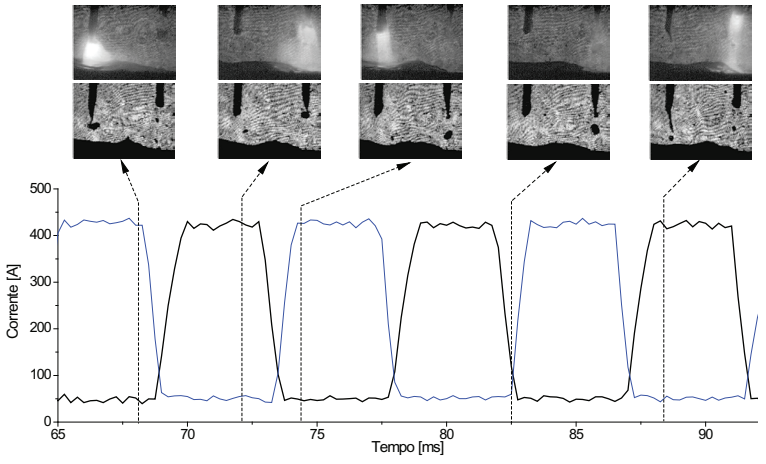


Figura 5.7 – Soldagens MIG/MAG Duplo Arame pulsada com correntes defasadas (com correntes médias baixas, evidenciando a minimização da deflexão magnética)

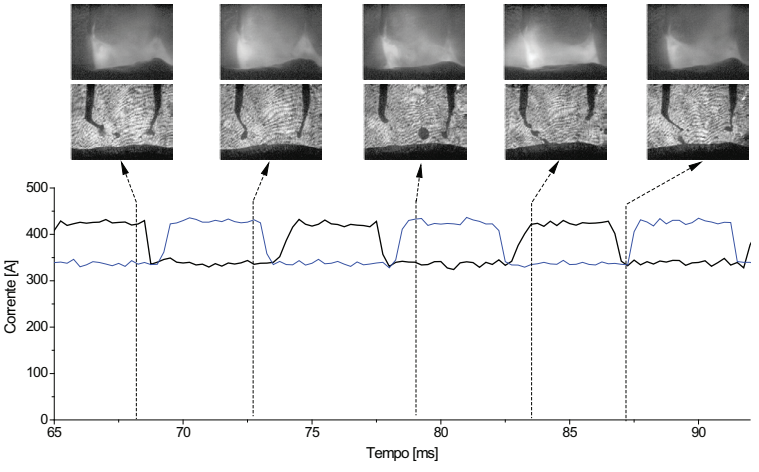


Figura 5.8 – Soldagens MIG/MAG Duplo Arame pulsada com correntes defasadas (com correntes médias altas, apresentando a deflexão magnética)

Mas existe outra razão forte, embora não largamente comentada, para usar corrente pulsada nos dois arames. Quando se usa fontes operando no modo tensão constante, é mais difícil regular as correntes em cada arame, uma vez que, nesse tipo de fonte, a corrente é consequência da regulagem da tensão e da velocidade de alimentação. Por outro lado, a corrente pulsada trabalha com fonte operando no modo corrente constante, permitindo a regulagem da corrente de forma direta. Além disto, existem evidências de que a corrente pulsada por si só leva a maior penetração do que uma corrente de mesmo módulo em termos de valores médios, porém constante. Uma alternativa que está surgindo é ter o arame líder com corrente pulsada e o arame seguidor operando em curto-circuito controlado, facilitando, além da regulagem da corrente (ambos trabalham no modo corrente constante), a regulagem da tensão no arame seguidor.

Velocidade de alimentação (ou nível de corrente)

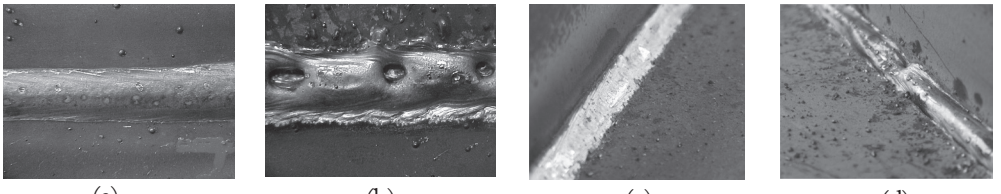
Como no processo MIG/MAG convencional, a regulagem da velocidade de alimentação e da tensão para cada arame vai determinar o nível de corrente para uma dada condição (*DBCP*, gás de proteção, arame-eletrodo etc.). Naturalmente, no caso de sistemas com corrente pulsada, o sistema é sinérgico (visto no Item 4.1.1) e a regulagem pode ser pela corrente. De qualquer forma, sempre haverá uma relação de dependência entre corrente e velocidade de alimentação. Como o objetivo é o aumento da capacidade de produção, no MIG/MAG Duplo Arame a velocidade de alimentação em cada arame varia de 7 a 20 m/min (com corrente média estando entre 250 a 500 A, também em cada arame). A prática mostra que esta regulagem deve privilegiar a corrente de o arame líder estar de 40 a 60% maior do que a do arame seguidor. Devido às altas energias envolvidas, recomenda-se utilizar uma unidade de refrigeração de água (muitas vezes denominada de *chiller*) para as tochas, ao invés das convencionais unidades de resfriamento (muitas vezes chamadas de *coolers*), evitando, ao manter a temperatura da tocha baixa, o mau funcionamento da combinação arame-bico de contato. Aconselha-se também a fazer uma refrigeração separada para o bocal (muitas tochas já vêm com este artifício).

Velocidade de soldagem

A velocidade de soldagem é regulada de acordo com o volume desejado do cordão, função, por sua vez, da aplicação. No caso de filetes

em juntas em ângulo ou preenchimento de chanfro de chapas grossas, trabalha-se com velocidade de 1 a 2 m/min, desde que satisfazendo o volume de cordão. Mas um caso típico de aplicação do processo MIG/MAG Duplo Arame é em componentes com chapas finas, na qual velocidades de soldagem altas são o alvo para aumentar a produtividade da produção seriada. Nestes casos, como o volume do cordão é pequeno e a taxa de deposição é alta, consegue-se trabalhar com velocidades de soldagens tão altas como 3 a 4 m/min.

Além das considerações de formação de cordão já discutidas no Item 1.6, uma limitação da velocidade de soldagem neste processo, mesmo com o volume do cordão desejado, é o problema de instabilidade do cordão, refletindo em cordões muito irregulares (Figura 5.9) que muitas vezes se confunde com um erro na regulagem de outros parâmetros. Posição plana e chapas limpas de oxidação são condições que permitem atingir as maiores velocidades. Quanto menor o comprimento de arco, maior a velocidade, mas arcos muito curtos podem provocar excesso de respingos e a eficiência de deposição pode se tornar tão baixa que retira a vantagem do processo. Na verdade, esta instabilidade de cordão acontece também no MIG/MAG convencional, mas ao trabalhar com apenas um arame e *DBCP* menores, uma formação não adequada do cordão (mordedura, falta de penetração, dimensão insuficiente etc.) vai ocorrer antes que seja atingido o fenômeno de instabilidade propriamente dito do cordão. Este fato ajuda a explicar a razão de conseguir velocidades com duplo arame maiores do que o dobro com arame único no mesmo nível de corrente.



(a) (b) (c) (d)

Figura 5.9 – Instabilidade de cordão que acontece quando a velocidade de soldagem ultrapassa o limite para as dadas condições de soldagem. Juntas com chapas de aço de 3 mm sobrepostas, AWS ER70S-6 de 1,2 mm, $I_{leader} \approx 355$ A e $I_{seguidor} \approx 250$ A - (a) 1,8 m/min; (b) 2,1 m/min. Juntas em ângulo com chapas de aço de 9 mm, AWS ER70S-6 de 1,2 mm, $I_{leader} \approx 420$ A e $I_{seguidor} \approx 330$ A - (c) e (d) a 1,5 m/min, mostrando ser esta a velocidade limite (pouco robusta)

Ângulo de ataque

A prática tem demonstrado que o ângulo de ataque (ver conceito no Item 1.6 e Figura 1.61) no MIG/MAG Duplo Arame deva ser sempre de 10 a 15º no sentido empurrando (Figura 5.10), de tal forma a obter melhores acabamentos de cordão e maiores velocidades de soldagem sem instabilidade da poça fundida. Porém, como muitas das tochas possuem arames entrando obliquamente, normalmente se posiciona a tocha de tal forma a se ter o arame líder perpendicular e o seguidor inclinado, como mostra a Figura 5.10(b), sob o argumento de que a função do arame líder é penetrar e a do seguidor é dar acabamento. Mas é importante ressaltar que existem tochas nas quais os dois arames são paralelos (Figura 5.10(a)).

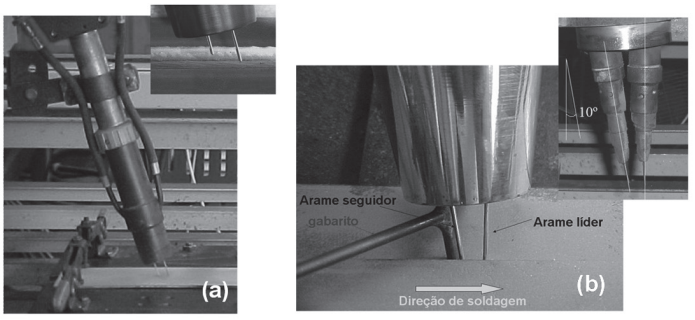


Figura 5.10 – Posicionamento de tochas em relação ao ângulo de ataque: (a) tochas com arames paralelos; (b) tochas com arames não paralelos

Diâmetros dos arames-eletrodo

O diâmetro de arame mais usado em MIG/MAG Duplo Arame é o de 1,2 mm. Entretanto, muitos usuários, pelo fato de estarem usando correntes muito altas, principalmente no arame líder, adotam um arame de 1,6 mm para este caso. É discutível a vantagem deste procedimento frente às dificuldades operacionais que surgem, principalmente para automação. Por outro lado, arames de maior diâmetro requerem equipamentos com capacidade menor de velocidade de alimentação.

5.2 – Processos de soldagem combinados (híbridos)

Em uma nova abordagem na procura por processos de soldagem com maior capacidade de produção e produtividade, surgiram os chamados "Processos Híbridos de Soldagem". Trata-se da associação física de

dois processos, como o MIG-Laser[32] e o Plasma-MIG, de maneira a aproveitar os lados mais atrativos de cada um. No caso do MIG-Laser, por exemplo, ao se unir um processo com aporte apenas de calor (Laser) com um processo que também agrega material de adição (MIG), conseguiu-se alcançar um maior controle geométrico e químico do cordão (melhorando propriedades mecânicas e reduzindo susceptibilidade a trincas), mas ainda mantendo-se (ou até aumentando-se) a capacidade produtiva de cada processo isoladamente.

5.2.1 – Soldagem MIG-Laser

As soldagens MIG e por Laser são usadas na indústria há muito tempo, a primeira de forma mais abrangente, enquanto a segunda em aplicações mais específicas, em componentes de maior valor agregado. Apesar de não serem considerados concorrentes, cada um dos processos apresenta características próprias que sobressaem ao olhar do usuário como importantes vantagens de um sobre o outro. Isto porque nenhum deles é livre de limitações sérias.

O feixe laser proporciona uma densidade alta de energia num ponto de foco (até 10^6 W/cm^2). Devido à intensidade e concentração de energia, não há muito tempo para o calor dissipar, e os metais de base sob o ponto de foco alcançam temperaturas de evaporação. Assim, uma cavidade se forma, permanecendo aberta por causa da pressão do material evaporando. Esta abertura facilita o feixe laser penetrar ainda mais profundamente no material de base e quase toda a energia do feixe contribui para a formação de uma poça de fusão. À medida que o feixe laser se move ao longo da peça, o metal fundido preenche o espaço por trás da cavidade e, em seguida, se solidifica (Figura 5.11). Forma-se assim um *cordão esbelto* (alta relação penetração-largura). Como a energia térmica do laser é gasta praticamente na fusão (alto rendimento térmico de fusão), quase que exclusivamente apenas o calor latente de solidificação e o de resfriamento do cordão serão produzidos para a peça nos contornos do cordão. Como consequencia, a zona termicamente afetada também será estreita, propiciando distorções reduzidas. Se o laser tiver alta potência, velocidades altas de deslocamento do feixe (velocidades de soldagem) podem ser impostas.

[32] - O termo MIG (*Metal Inert Gas*) é o mais empregado no mundo inteiro na designação de processos híbridos que tenham o processo MIG/MAG, (ou *GMAW*, na denominação americana) como base, apesar de se usar muitas vezes gases ativos. Assim, para muitos a denominação mais correta deveria incluir também MAG (*Metal Active Gas*).

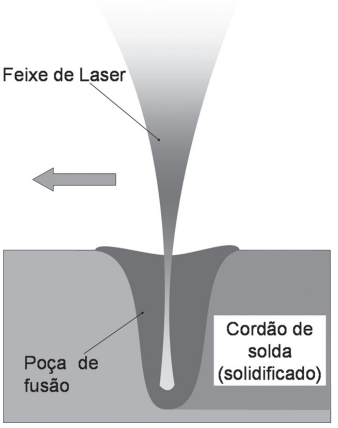


Figura 5.11 – Ilustração esquemática da soldagem a Laser

Altas penetrações, reduzidas áreas fundidas e afetadas pelo calor, menores tensões e deformações e possibilidade de soldagens velozes são as principais vantagens da soldagem a laser em comparação com a maioria dos processos de soldagem a arco. Por outro lado, além do custo de aquisição, manutenção e operação do equipamento, a soldagem a laser demanda um controle muito rígido da preparação da junta (baixíssima tolerância a desalinhamentos e aberturas da raiz) e precisão na movimentação da tocha em relação à linha central da junta. Mas outra importante limitação desse processo, principalmente para soldagens de chapas mais espessas, é o alto índice de esbeltez dos cordões, que favorece a formação de trincas de solidificação (lembrar que, como apresentado, o laser faz solda autógena, sem a possibilidade de acréscimo de material de adição que poderia ter propriedades para formar cordões menos susceptíveis a este defeito).

O processo MIG/MAG, por outro lado, possui densidade de energia significativamente inferior (por volta de 10^4 W/cm^2), ou seja, tem uma mancha focalizada de maior diâmetro sobre a superfície do material (menor concentração de calor, maior zona afetada pelo calor e maiores tensões térmicas), mas é caracterizado por sua habilidade em preencher aberturas de raiz (maior tolerância dimensional da junta). Além disso, o processo MIG/MAG oferece a possibilidade de influenciar na microestrutura do metal de cordão, através do metal de adição, e o custo operacional é relativamente baixo. Sua maior desvantagem seria a baixa penetração, que faz demandar um número maior de passes para preencher a mesma junta (menor produtividade).

A ideia de um processo híbrido com estes dois processos é a atuação conjunta sobre a mesma região de soldagem (Figura 5.12), oferecendo os benefícios dos processos em separado e superando algumas das desvantagens individuais de cada um. A profundidade de penetração da solda seria determinada principalmente pelo poder do feixe laser e pela distribuição de energia (ou pela densidade dela), enquanto a largura de solda seria governada principalmente pelo arco MIG, particularmente pelo seu comprimento. Assim, aberturas da raiz excessivas, não regulares e até certo ponto desalinhadas não seriam um problema tão sério. O processo MIG-Laser pode tratar aberturas de até 2,0 mm (se aplicar uma oscilação do arame, é possível trabalhar com aberturas ainda maiores), efeito alcançado graças a uma poça de fusão mais larga comparado com a soldagem a laser. A Figura 5.13 ilustra um cordão realizado pelo processo híbrido MIG-Laser.

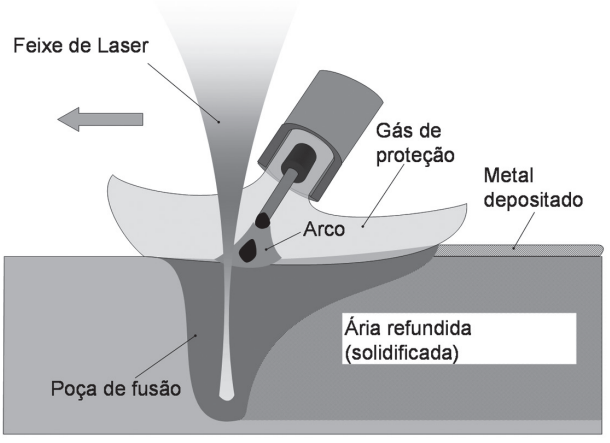


Figura 5.12 – Ilustração do processo MIG-Laser

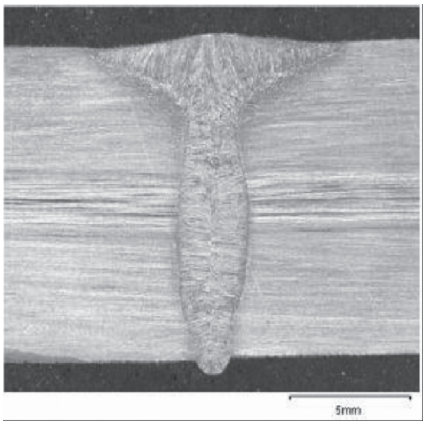


Figura 5.13 – Macrografia de uma junta soldada com o processo MIG-Laser (Vandewynckèle et al, 2007)

Na soldagem híbrida MIG-Laser, o arco do MIG passa a exercer uma pressão sobre a superfície da poça de fusão, provocando um afundamento e facilitando a atuação do feixe laser mais no fundo. Acredita-se que esta seja a razão para se verificar um aumento ainda maior de profundidade de penetração quando do uso desta técnica, com o cuidado de se otimizar a posição de foco do feixe laser. Assim, em muitas aplicações, são alcançadas velocidades de soldagem mais altas de que nos processos separados (Figura 5.14). As velocidades de soldagem mais altas permitem reduzir tempos de fabricação e, consequentemente, custos. Considerando que o processo está operando em velocidades de soldagem mais altas, o aporte de calor é inferior ao processo a arco convencional, resultando em menos deformação de peças soldadas (às vezes igualado à soldagem a laser).

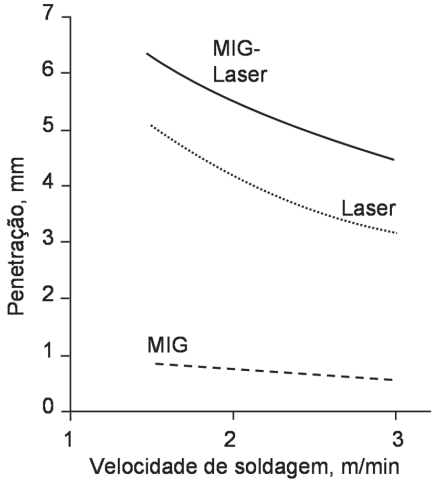


Figura 5.14 – Penetração *versus* velocidade de soldagem para processos MIG, Laser e MIG-Laser (Booth, 2007)

Mas é a Figura 5.15 que oferece melhor visão comparativa do ponto de vista prático entre os processos Laser, MIG/MAG e MIG-Laser, com os objetivos de realizar uma mesma união (seção soldada). À parte das características geométricas do cordão e das tensões/deformações já apontadas acima, pode-se perceber que, frente à necessidade de preencher um volume de chanfro maior, já que tem menor penetração, o processo MIG/MAG requer uma alta taxa de deposição de material (inexistente no laser). Já no processo híbrido, com maior penetração e menor volume de chanfro, a taxa de deposição cai para a metade (menor custo com manuseio e compra de arames). Mas o mais importante é que se pode usar uma potência de laser bem menor agora (25% menos potente,

no caso do exemplo). Este fato passa muitas vezes despercebido pelos usuários, mas a possibilidade de se usar lasers de menor potência tem grande reflexo sobre os custos (o preço de um laser cresce exponencialmente com sua potência) e com a operacionalidade do processo (cabeçote laser de menor tamanho – ver ilustração de um cabeçote na Figura 5.16).

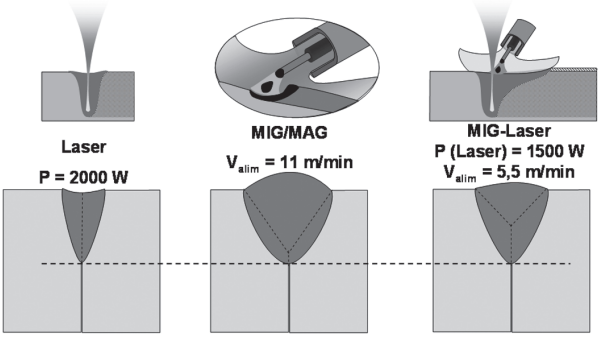
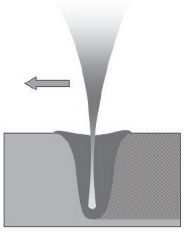
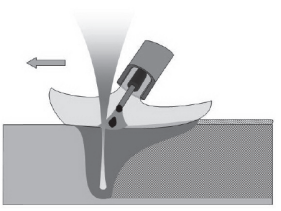


Figura 5.15 – Comparação entre geometrias de cordões de soldagens a laser, MIG e MIG-Laser, com a mesma profundidade de penetração e velocidade de soldagem (adaptado de catálogo da empresa Fronius, sob consentimento)

Entretanto, a união MIG-Laser apresenta limitações características de um processo híbrido, ou seja, maior complexidade operacional do que cada processo separadamente. Como mostra a Tabela 5.1, o subprocesso de soldagem a laser é principalmente caracterizado pela energia e parâmetros do feixe e posição de foco. Por outro lado, a regulagem do subprocesso de soldagem MIG é normalmente feita através do arame, gás de proteção e do equipamento. Mas como o desempenho dos subprocessos não é tão aditivo e complementar, como dissertado acima, mas interativo e de difícil previsão, há necessidade de se definir parâmetros de soldagem adicionais além dos próprios parâmetros de individuais dos processos em separado que precisam ser adaptados.

Figura 5.16 – Ilustração de um cabeçote (tubo laser e tocha MIG/MAG acoplados) para a soldagem MIG-Laser (Cortesia da Fronius, Áustria)

Tabela 5.1 – Parâmetros típicos de regulagem para soldagens MIG, Laser e MIG-Laser

MIG	Laser	MIG-Laser
		
• Tensão de arco • Velocidade de alimentação de arame • Gás de proteção • Diâmetro e material do arame • Parâmetros de arco pulsado (se aplicável) • Ângulo de ataque da tocha • DBCP	• Velocidade de soldagem • Intensidade do feixe • Qualidade do feixe • Posição focal • Regime (pulsado ou contínuo) • Alimentação (autógena ou com arame) • Tipo e vazão do gás de proteção • Ângulo de injeção do gás de proteção	• Velocidade de soldagem • Intensidade do feixe • Qualidade do feixe • Posição focal • Regime (pulsado ou contínuo) • Distância e inclinação relativa das fontes de calor • Tipo e vazão de proteção; • Ângulo de injeção do gás de proteção • Tensão do arco MIG • Velocidade de alimentação de arame • Diâmetro e material do arame • Parâmetros de pulsação MIG (se aplicável) • Ângulo de ataque da tocha • DBCP

Por exemplo, a localização do feixe laser em relação ao arco MIG/MAG (se líder ou seguidor) é muito importante, afetando principalmente a forma da penetração. A prática mostra que a montagem Laser-líder é a preferível para juntas com menor tolerância de montagem e para soldagens de alumínio e suas ligas. Para juntas com uma certa folga para abertura, o arco MIG/MAG-líder é sempre melhor. A mistura de gás de proteção tem também uma importância especial para soldagem MIG-Laser. Como a formação de plasma, inevitável no processo híbrido, absorve potência do laser, a formação dele deve ser minimizada. Em muitos casos, o hélio é usado para reduzir este efeito. São importantes também os ângulos entre a peça e o feixe e a peça e a tocha de soldagem, assim como propriedades do material a soldar (composição química, condutividade térmica etc.) e os parâmetros da junta (tipo da junta, espessura das chapas, geometria da abertura da raiz etc.).

5.2.2 – Soldagem Plasma-MIG

As limitações do processo MIG-Laser (principalmente, os elevados investimentos e a demanda de pessoal superespecializado para regulagem, operação e manutenção) estimularam o desenvolvimento de um outro processo híbrido de soldagem, a saber, o processo Plasma-MIG, que aos poucos vem tendo sua aplicação contemplada em regime de produção, mas ainda com pouca informação básica e tecnológica a seu respeito. A ideia de utilizar o plasma no lugar do laser vem, além do seu menor custo operacional, da maior similaridade com processos a arco, com os quais os usuários têm maior experiência e confiança.

A princípio, o equipamento necessário ao processo Plasma-MIG seria composto de um equipamento convencional para soldagem MIG/MAG, de um equipamento convencional para soldagem a plasma, de uma tocha que permitisse internamente o acoplamento dos arcos dos dois processos e de um sistema de controle que sincronizasse ambos. Porém o processo não é tão simples assim. O primeiro desafio tecnológico para se desenvolver o processo Plasma-MIG foi o de se procurar em uma única tocha alojar os dois processos, como esquematizado na Figura 5.17. A tocha deve ter a capacidade de gerar, simultaneamente, o arco voltaico entre o eletrodo permanente e a peça a ser soldada (arco-plasma) e o arco voltaico entre o eletrodo consumível, na forma de arame, e a peça a ser soldada (arco MIG). Os dois arcos têm de agir sobre a mesma poça. Infelizmente, a tocha, como esquematizada na Figura 5.17, não mostrou ser muito operacional. Além das características demandadas, ela precisa ser suficientemente compacta para ser facilmente manipulada por equipamentos automatizados e se adequar às geometrias complexas de peças (há de se entender que processos de soldagem mais complexos encontrarão seus nichos de aplicação em situações igualmente mais complicadas).

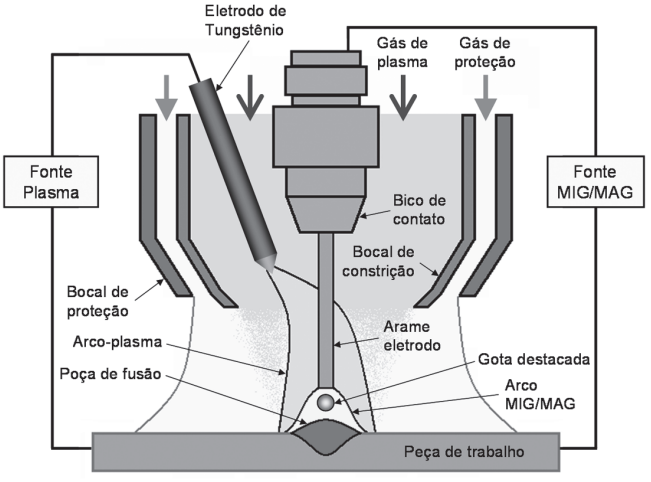


Figura 5.17 – Princípio de funcionamento do processo Plasma-MIG

Nesta direção apareceu uma primeira versão comercial do processo Plasma-MIG. A Figura 5.18 (vista de cima) ilustra as partes de uma tocha Plasma-MIG. O eletrodo do processo Plasma se torna anular, permitindo que o bico e o arame do processo MIG passem concentricamente por dentro dele (minimizando a interferência magnética maléfica que um arco teria sobre o outro e sobre a transferência metálica). Assim, o eletrodo deixa de ser de tungstênio, passando a ser fabricado de ligas de cobre (com refrigeração interna para garantir a sua refratariedade), podendo ou não ser revestido ou possuir inserto de grafita ou tungstênio. Com este tipo de eletrodo, o gás de plasma não precisa ser totalmente inerte e pode-se usar a polaridade CC+, que garante maior estabilidade na porção MIG/MAG do processo. Naturalmente, o bocal constritor de plasma passa a ter um orifício maior do que no processo convencional, para permitir a passagem, de forma concêntrica, do arame. A Figura 5.18 (vista de baixo) apresenta uma tocha Plasma-MIG na concepção comercial, ilustrando o desafio tecnológico vencido. Entretanto, deve-se ressaltar que nesta concepção não se tem exatamente o processo plasma, pela falta de constrição do arco plasma. Por isto, diferentemente do fabricante, essa versão do processo é referenciado neste livro por Plasma-MIG com Arcos Concêntricos (melhor seria até ser chamado de processo MIG/MAG com arco duplo concêntrico, mas para evitar confusão procurou-se manter a menção ao Plasma).

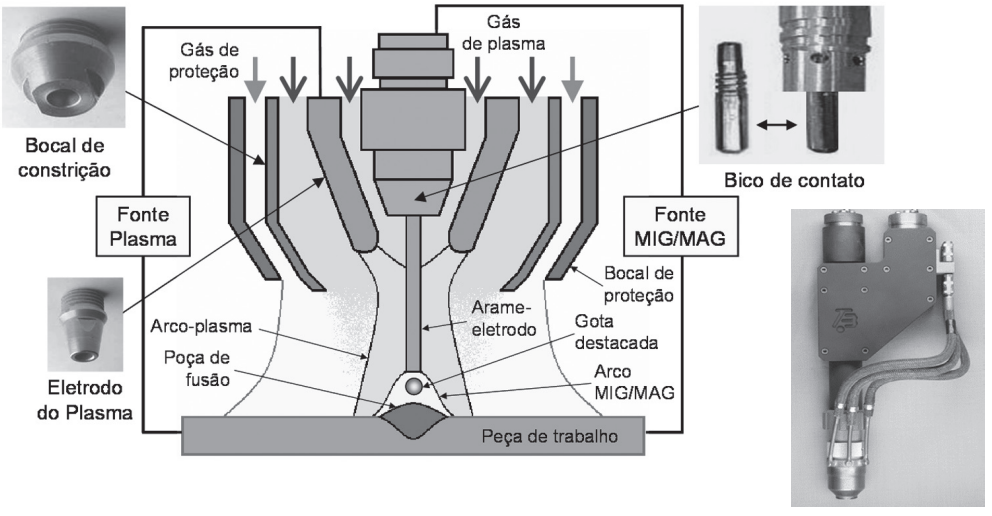


Figura 5.18 – Desenho esquemático de uma tocha para soldagem Plasma-MIG com Arcos Concêntricos, com destaque para os componentes principais (acima) e exemplo de uma tocha comercial para o processo Plasma-MIG (abaixo): sem os cabos, esta tocha pesa 1700 gramas e mede nas suas dimensões maiores 294 mm, comprimento, e 112 mm, largura (acima, adaptado de figura produzida pelo Grupo Labsolda/UFSC, gentilmente cedida, sendo a foto da tocha cortesia da TBi, Alemanha)

A concepção mais utilizada para o processo Plasma-MIG com Arcos Concêntricos é com duas fontes independentes, cada uma alimentando a sua parte. Em função de trabalhar com um eletrodo permanente, a fonte para o Plasma deve apresentar característica estática de corrente constante, enquanto que a fonte MIG/MAG pode ser de característica estática de corrente ou de tensão constante. A corrente pulsada pode ser utilizada tanto no arco MIG/MAG quanto no Plasma, podendo ser, para determinados materiais de adição e tipos de junta, uma importante ferramenta na estabilização dos arcos e da transferência metálica.

Os equipamentos de soldagem Plasma-MIG não são exatamente convencionais como inicialmente mencionado, principalmente o da parte MIG/MAG. Uma primeira demanda por parte do equipamento é a forma de abertura do arco. Devido ao tipo de eletrodo e configuração interna da tocha, o método de abertura por arco-piloto do Plasma não funciona adequadamente para o Plasma-MIG. A melhor forma encontrada foi a denominada *Soft Start*, cuja operacionalidade é explicada com o auxílio da Figura 5.19 (no caso, o alimentador de arame não é mais o convencional, usado para MIG/MAG). No início, as duas fontes (ou alternativamente só a fonte Plasma) apresentam tensão em vazio, e o arame-eletrodo da porção MIG/MAG do processo é alimentado em direção à peça. Ao tocá-la, o movimento do arame é interrompido, e a fonte gera um arco de baixa intensidade de corrente (em torno de 8 a 20 A), sem fusão considerável do arame. Em seguida, o alimentador do arame inverte a rotação e o arame retrocede em direção à tocha de soldagem, levando progressivamente o arco para dentro da tocha, atingindo as proximidades do eletrodo do plasma. Como a fonte Plasma já possui tensão em vazio, ocorre o acendimento imediato do arco-plasma, devido à atmosfera ionizada pelo arco MIG/MAG de baixa potência. Após o acendimento do arco-plasma, o arco MIG/MAG é extinto (corte de energia) com o objetivo de impedir a transferência metálica e de proporcionar um pré-aquecimento no início da junta somente com a energia do arco-plasma. Finalmente, o arame volta a se deslocar em direção à peça de trabalho e, como a fonte MIG/MAG apresenta de novo tensão em vazio e o meio está ionizado pelo arco-plasma, ocorre o reacendimento espontâneo do arco MIG/MAG, sem necessidade de curto-circuito (isso garante um início de cordão de solda livre de respingos), mas já com a corrente regulada para a operação de soldagem.

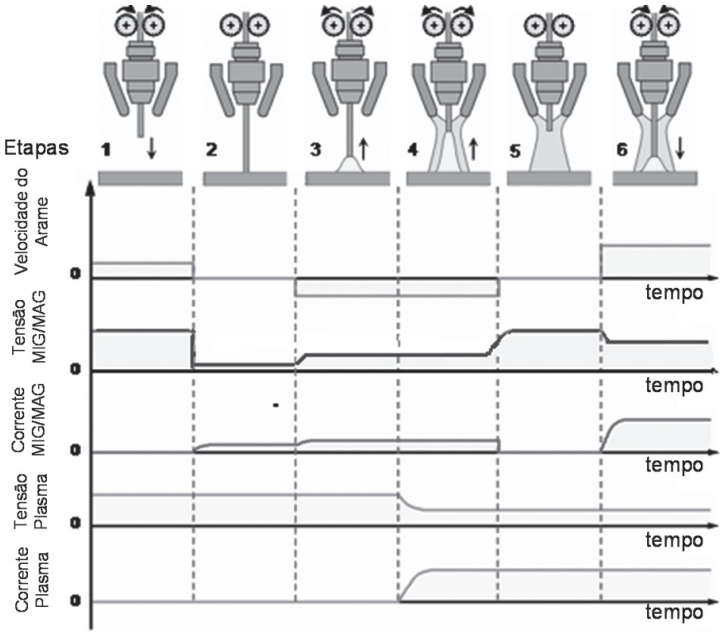
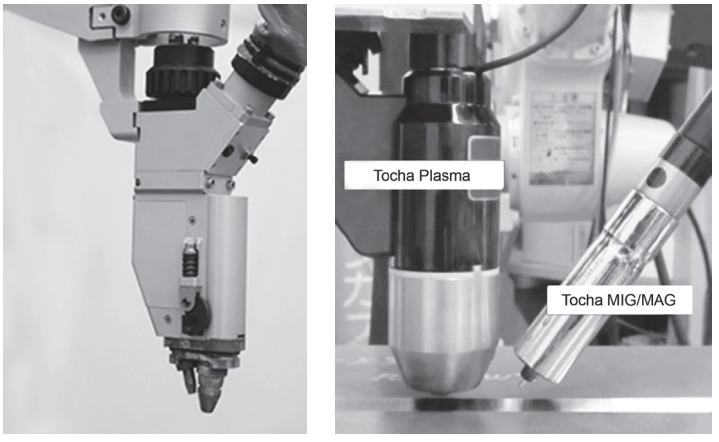


Figura 5.19 – Esquema da abertura de arco no processo Plasma-MIG pelo método *Soft Start*

Outra alteração, em termos de praticidade dos equipamentos, seria a necessidade de um comando único das duas fontes. Para isso, uma interface microprocessada faz a sequência de abertura do arco e comanda os parâmetros pré-regulados para o processo. Na forma mais simples, regula-se o valor da corrente do plasma e da tensão e da velocidade de alimentação da parte MIG/MAG. Ao se usar corrente pulsada, na porção Plasma ou MIG/MAG, as regulagens são feitas de forma coerente (no caso do MIG/MAG, de forma sinérgica). De uma forma geral, quanto maior a corrente MIG/MAG, maior é a taxa de deposição e a penetração e, quanto maior a corrente plasma, maior é a largura do cordão. Como se vê, ao contrário do laser no MIG-Laser, o papel do plasma é a formação do cordão.

A segunda versão comercial do Plasma-MIG apareceu em 2008, sob a denominação de Super-MIG, patenteada pela empresa Plasma-Laser Technologies (PLT). Nesta versão, a porção Plasma vai literalmente à frente da porção MIG/MAG, de forma sequencial, como se faz com o MIG-Laser. Por isto é aqui referenciada como Plasma-MIG com Arcos Sequenciais. A Figura 5.20(a) ilustra uma tocha comercial desta versão. Apesar de patenteada, muitos usuários estão simplesmente acoplando uma tocha MIG/MAG convencional a uma também convencional tocha de Plasma, como ilustra a

Figura 5.20(b). Um característica que diferencia esta versão (Plasma-MIG com Arcos Sequenciais) da versão Plasma-MIG com Arcos Concêntricos é a possibilidade de o arco plasma realizar a operação no modo *key-hole*, como no MIG-Laser. O arco MIG/MAG deve ser aberto após a formação do *key--hole*. No caso do Plasma-MIG com Arcos Sequenciais, o gás de proteção da porção plasma é inerte e a polaridade CC-. Na porção MIG/MAG, a polaridade é preferencialmente CC+, mas há a possibilidade de se sincronizar as correntes do plasma e MIG/MAG de forma defasada se aplicadas correntes pulsadas em ambas porções. O uso de corrente pulsada aliada a uma razoável distância entre os arcos (15 a 25 mm) minimizam a interferência magnética entre eles. Para reduzir essa interferência ainda mais, o fabricante do Super-MIG introduz um campo magnético controlável entre os arcos.



(a) (b)

Figura 5.20 - Exemplo de tochas usadas no Plasma-MIG com Arcos Sequenciais: (a) modelo Super-MIG, da PLT; (b) montagem de duas tochas convencionais (segundo Yamane et al., 2013)

5.3 – Bibliografia para o Capítulo 5 (referenciada e para leitura complementar)

Neste item é apresentada uma lista de materiais bibliográficos, dos quais foram tiradas informações e/ou que tratam do assunto com maiores detalhes (alguns foram citados, como referência, ao longo do texto).

Booth, Geoff; *Manufacturing with lasers developments and opportunities*, IIW Doc. IV-854-04, 2004.

Chigarev, V. V.; Makarenko, N. A.; Kondrashov, K. A.; Voropaj, N. M.; *Features of electrode wire melting in surfacing by plasma-MIG process*, Paton Welding Journal, nº.8. Aug. 2001. pp.10-12.

Cunha, T. V. & Dutra, J. C.; *Processo Plasma-MIG – contribuição do arco plasma na capacidade de fusão do arame*, Soldagem & Inspeção, São Paulo, vol. 12, nº. 2, p.89-96, Abr./Jun. 2007.

Dykhno, I. & Davis, R.; *Joining GMAW and GTAW – Hybrid welding takes on a whole new meaning with new technology developments*, The Fabricator, Nov. 2006, Disponível em: http://www.thefabricator.com/Printer_Friendly_Article.cfm?ID=1492, Acesso em: 7 julho 2007.

Essers, W. G; Jelmorini, G; *Method for plasma MIG welding*, US Patent 3.891.825, 1975.

Essers, W. G; Jelmorini, G; Tichelaar, G. W.; *Arc characteristics and metal transfer with plasma-MIG welding*. Metal Construction and British Welding Journal. Dec. 1972, p.439 – 447.

Essers, W. G.; Method of and device for plasma MIG welding, US Patent 4,233,489, Nov. 1980.

Groetelaars, P. J., Morais, C. O. & Scotti, A.; *Influência do comprimento do arco sobre a transferência metálica no processo MIG/MAG duplo-arame com potencial único*, Soldagem & Inspeção, vol. 12, nº. 4, Out./Nov. 2007, pp. 276 -284, (ISSN 0104-9224 printed/ISSN 1980-6973 on-line).

Groetelaars, P. J., Scotti, A.; *Influência do teor de CO_2 no gás de proteção sobre a transferência metálica no processo MIG/MAG duplo-arame*, Soldagem & Inspeção, vl. 12, nº. 1, Jan./Mar. 2007, pp. 29 -37, (ISSN 0104-9224 printed/ISSN 1980-6973 on-line).

Harris, I. D.; *Plasma arc welding*, ASM Metals HandBook: vol. 6 - Welding, Brazing and Soldering, 1994.

Ignatchenko, G. & Dykhno, I.; *MIG plasma welding*, International Patent PCT WO 2004/043639 A1, 2004.

Kutsuna, Muneharu & Liu, Zhongjie; *Developments and applications of laser-Arc hybrid welding*, IIW Doc. IV -939 – 07, 2007.

Motta, M. F., Dutra, J. C., Gohr Jr, R. & Scotti, A.; *A study on out-of-phase current pulses of the double--wire MIG/MAG process with insulated potentials on coating applications*, In: Welding & Cutting, vol. 4, nº. 1, Jan. 2005, DVS-Verlag, Germany, pp. 26-32 (ISSN 0036-7184).

Motta, M. F., Dutra, J. C., Gohr Jr, R., Scotti, A; *A study on out-of-phase current pulses of the double wire MIG/MAG process with insulated potentials on coating applications*: part I. J. Braz. Soc. Mech. Sci.& Eng., Apr./June 2007, vol. 29, no. 2, p.202-206. ISSN 1678-5878.

Motta, M. F., Dutra, J. C., Gohr Jr, R., Scotti, A.; *A study on out-of-phase current pulses of the double wire MIG/MAG process with insulated potentials on coating applications*: part II. J. Braz. Soc. Mech. Sci.& Eng., Apr./June 2007, vol. 29, nº. 2, p.207-210. ISSN 1678-5878.

Oliveira, M. A.; Desenvolvimento do processo de soldagem híbrido plasma-MIG para operações de soldagem e brasagem, tese de doutorado, UFSC, Florianópolis, SC, 2006.

Reis, R. P. & Scotti, A.; Fundamentos e prática da soldagem a plasma, 1ª. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2007. v. 1000. 147 p.

Resende, A.A.; *Ressurgimento do processo plasma-MIG como opção para a indústria*, revista da Soldagem, ABS, vol. 11, 2007.

Resende, A.A.; Estudo de Características Operacionais do Processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 2013

Scotti, A., Morais, C. O. & Vilarinho, L. O.; *The effect of out-of-phase pulsing on metal transfer in twin--wire GMA welding at high current level*, Welding Journal, 85 (10), Oct. 2006, AWS, pp. 225s-230s (ISSN 0043-2296).

Souza, D., Fernandes, D. B., Scotti, A.; *Avaliação de novas abordagens para incrementar o desempenho do processo MIG/MAG Duplo-Arame*, XXXII Consolda - Congresso Nacional de Soldagem, ABS, 2-6 Out. 2006, Belo Horizonte, MG, CD ROM, artigo CT27, 10 p.

Vandewynckèle, A., Couso, E. V., De Lama. M. P., Rodríguez, G. Q.; *Hybrid welding of duplex stainless steel for shipbuilding industry*, IIW doc. IV-926-07, 2007.

WSI (Welding Solutions Inc.), *Super-MIG aplications*, Disponível em: <http://www.weldingsolutionsinc.com/applications.html > Acesso em: Julho de 2007.

Yamane, S. et al.; *Observation of Welding Phenomena in Two-electrode Welding of Plasma and MIG*, IIW Doc. 212-1295-13, 8 p.