

ANÁLISE DA TRANSFERÊNCIA METÁLICA DO ARAME TUBULAR COM PROTEÇÃO GASOSA

Temístocles de Sousa Luz

Rua João XXIII, 765 – CEP 38408-056, Santa Maria, Uberlândia-MG, tsluz@mecanica.ufu.br

Valtair Antonio Ferraresi

LAPROSOLDA. Campus Santa Mônica, Bloco 10, Uberlândia MG, valtairf@mecanica.ufu.br

Paulo Sergio. S. Balsamo

Praça 1º de maio, 09 – CEP 35180-018, Centro, Timoteo MG, pbalsamo@acesita.com.br

Resumo: O entendimento dos modos de transferência metálica na soldagem, atualmente tem proporcionado um grande desenvolvimento de técnicas e processos de união de materiais. Através desse entendimento é possível proporcionar, durante a soldagem, um melhor controle do processo além da automação com mais eficiência. Muitos dados se têm a respeito dos modos de transferência metálica na soldagem MIG/MAG com arames sólidos. O entendimento a esse nível se faz oportuno para o processo com arame tubular, através da identificação mais detalhada dos modos de transferência que ocorrem durante a soldagem do mesmo. Buscou-se então o levantamento do mapa de transferência metálica para o arame tubular comercial da classe 409Ti, analisando a influência da composição do gás de proteção (Ar + 2%O₂ e 5%O₂) e avaliando as principais diferenças nos modos de transferência para cada tipo de gás de proteção. Utilizou-se para tanto um sistema de filmagem de alta velocidade agregado a um sistema de laser e filtros para proporcionar a aquisição apenas da sombra do sistema projetado pelo laser emitido (shadowgrafia). Com isso, pôde-se avaliar com mais detalhes os modos de transferência deste tipo de consumível.

Palavras-chave: Transferência metálica, soldagem, arame tubular.

INTRODUÇÃO

A natureza da transferência metálica tem sido de grande interesse desde que o processo de soldagem a arco voltaico foi introduzido no mercado. Isto se deve ao fato da transferência metálica estar relacionada com a soldabilidade do material. Ela poderá afetar a estabilidade do arco, penetração do cordão de solda, a taxa de deposição, a posição de soldagem além da qualidade da solda. Portanto, o conhecimento de como o modo de transferência metálica influencia determinado processo de soldagem é importante para o controle e automação de tal processo, assim como para o desenvolvimento de consumíveis^(1, 2, 3). Seu prévio estudo possibilitou o desenvolvimento de novas técnicas as quais permitiram a redução tanto no nível de respingos quanto na geração de fumos, garantindo com isso um melhor ambiente de trabalho para o soldador⁽⁴⁾.

A transferência metálica pode ser descrita como o transporte de gotas metálicas da ponta do eletrodo à poça de fusão. De acordo com o tamanho e característica da transferência dessas gotas, diferentes modos de transferência são definidos.

A transferência metálica que ocorre nos processo de alimentação contínua seria classificada em duas categorias, sendo elas a transferência gerada por curto-circuito e a gerada por vôo livre. Essas duas classes de transferência podem ainda ser classificadas segundo o modo como a gota é formada na extremidade livre do arame é direcionada e transferida à poça de fusão⁽⁵⁾.

Muito embora possa ser verificada a incidência de modos “puros” de transferência para essas duas classes, muitos outros modos podem coexistir com características desses modos “puros”, caracterizando-se como modos mistos ^(6, 7). Tais modos de transferência ocorrem nas regiões que delimitam os modos “puros”, seria uma fase de transição de um tipo de transferência a outro. Tais modos ainda podem ser passíveis de mudança em função do gás de proteção utilizado na soldagem. Em trabalhos anteriores ⁽⁶⁾, verifica-se que com a variação do teor de O₂ no gás de proteção, a tensão superficial do metal fundido sofre variações, influenciando na transferência metálica.

O mapeamento dos modos de transferência metálica visa estabelecer os contornos da transferência em termos de variáveis de soldagem, tais como, tensão e/ou comprimento do arco, corrente e/ou velocidade de alimentação. A transferência metálica pode ser determinada por métodos, tais como, nível de respingo, som do arco, sistema de imagem a laser através do arco, inspeção visual direta do arco, grau de luminosidade do arco e aquisição de dados referentes ao sinal do arco. Os quatro primeiros métodos são passíveis de uma maior dificuldade para o controle automático, sendo normalmente usados para auxiliar a identificação dos modos e confirmar a interpretação dos sinais elétricos sobre a faixa dos mapas. Nos casos onde os modos de transferência se sobrepõem significativamente, os dados audiovisuais são utilizados para melhor definir os contornos dos mapas de transferência ⁽⁴⁾.

Ultimamente os métodos visuais desenvolveram-se de forma a possibilitar um maior detalhamento dos fenômenos que ocorrem na transferência metálica. Os principais métodos ópticos de análise envolvem a filmagem em alta velocidade e a técnica da sombra através do feixe de um laser (“shadowing techniques”). Com altas velocidades de filmagem (10² quadros por segundo ou maior), as propriedades dinâmicas da gota, formação e destacamento, podem ser gravadas e observadas com maiores detalhes ⁽⁴⁾.

Com base nesta discussão, objetiva-se o levantamento do mapa de transferência metálica para o arame tubular comercial da classe 409Ti, analisando a influência da composição do gás de proteção (Ar + 2%O₂ e 5%O₂) e avaliando as principais diferenças nos modos de transferência para cada tipo de gás de proteção.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O material de base empregado foi chapa de aço inoxidável experimental, cuja composição, segundo o fabricante, é 0,018%C, 0,63%Mn, 0,5%Si, 10,8%Cr e 0,35%Ni. As chapas testes foram confeccionadas em dimensões de 4 mm x 40 mm x 200 mm. As soldagens de simples deposição, na posição plana, foram realizadas empregando-se velocidades de alimentação de 1,5 a 12,5 m/min e tensões de referência de 18 a 32V. Foi empregado um sistema automático de soldagem, utilizando-se de uma mesa atrelada a um fuso, o qual, devido um controle de velocidade, pode estabelecer a velocidade de soldagem adequada aos experimentos realizados.

Utilizou-se para a soldagem uma fonte multiprocesso, no modo tensão constante, na polaridade positiva (cc+). A transferência metálica foi obtida do arame tubular comercial da classe 409 com, diâmetro de 1,2 mm. Sua composição de metal depositado, segundo o fabricante, é de 0,05%C; 0,60%Si; 0,70%Mn; 11,0%Cr e 1,0%Ti. Para a proteção do arco e da poça de fusão utilizou-se o gás de proteção comercial com composição de Ar + 2%O₂ e Ar + 5% O₂ com vazão de 14 l/min. A distância bico de contato peça (DBCP) foi mantida em 18 mm, com a tocha perpendicular à chapa. As filmagens em alta velocidade foram realizadas com uma câmera de filmagem a 2000 quadros por segundo, utilizando um feixe colimado de laser e um conjunto óptico composto por lentes e filtros de densidade neutra, aplicando-se a técnica da “shadowgrafia”. A observação, mensuração e caracterização da transferência metálica foram feitas com o auxílio de softwares específicos ⁽⁸⁾.

3. DEFINIÇÃO DOS MODOS DE TRANSFERÊNCIA

A definição dos modos de transferência foi baseada na observação de formação e transferência das gotas, após a filmagem em alta velocidade. Durante a montagem dos mapas de transferência para as duas condições de soldagem (dois tipos de gás de proteção), foi verificada a ocorrência de modos semelhantes os quais destacam-se: globular (GL), curto-circuito (CC), goticular (GT), goticular com alongamento (GTE), curto-circuito/repulsão (CC-RE), globular/curto-circuito/goticular (GL-CC-GT), globular/goticular (GL-GT) e goticular com alongamento/goticular (GTE-GT). Para a soldagem utilizando-se o gás de proteção com 2% O₂ verificou-se a presença do modo misto curto-circuito/goticular (CC-GT) e curto-circuito/goticular/repulsão (CC-GT-RE). Para a soldagem utilizando o gás de proteção com 5% O₂ observou-se os modos goticular/repulsão (GT-RE) e o modo repulsão (RE). Pode-se verificar esses modos de transferência nas figuras que se seguem, bem como a descrição de cada modo observado com base na literatura corrente para arame sólido^(6,7).

Transferência Globular (GL) – Neste modo de transferência as gotas são maiores que o diâmetro do eletrodo com baixa frequência de transferência (Figura 1).

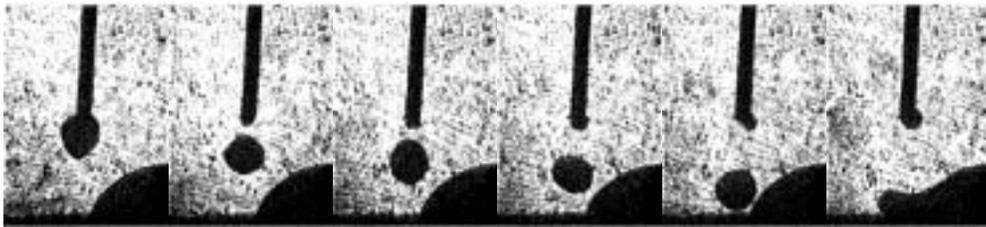


Figura 1 – Transferência Globular.

Transferência Curto-circuito/Repulsão (CC-RE) – Observa-se nesse modo de transferência a incidência de curtos-circuitos e aleatoriamente acontecem repulsões, como se pode verificar na (Figura 2).

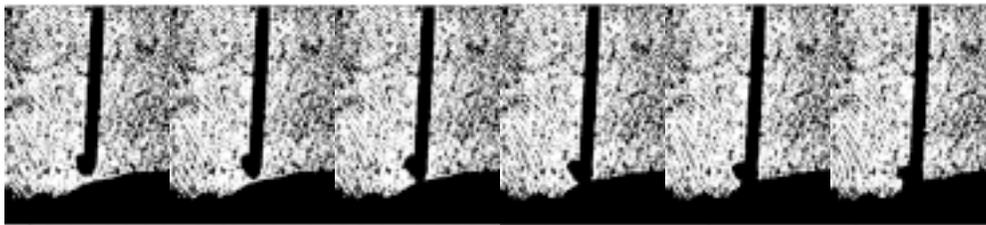


Figura 2 – Transferência metálica por curto-circuito/repulsão.

Transferência Goticular (GT) – O destacamento das gotas ocorre antes que estas atinjam um diâmetro superior ao diâmetro do eletrodo (Figura 3). Dependendo do nível de corrente a extremidade livre do eletrodo poderá tornar-se afunilada durante a formação das gotas, no entanto o comprimento desse afunilamento não ultrapassa o diâmetro do eletrodo.

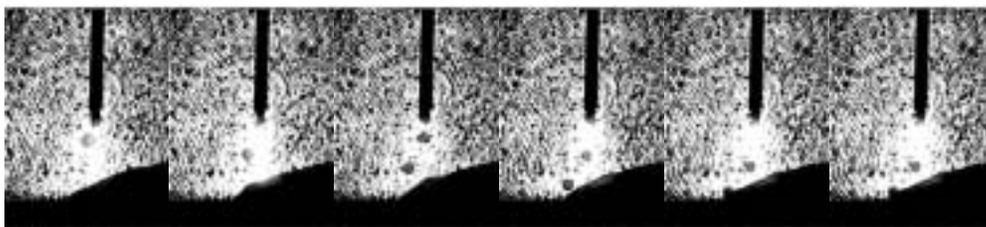


Figura 3 - Transferência metálica goticular.

Transferência Goticular com alongamento (GTE) – As gotas são lançadas da extremidade de uma ponta do eletrodo alongada (afunilada), cujo comprimento é maior do que o diâmetro do eletrodo (Figura 4). Observa-se uma certa instabilidade no pivotamento, certamente em função do fluxo que está sendo fundido junto com a capa metálica.

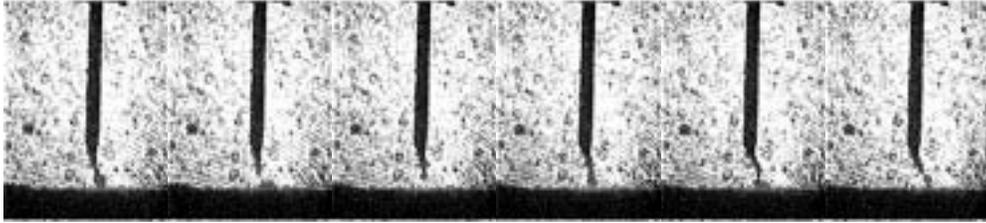


Figura 4 – Transferência metálica goticular com alongamento.

Transferência Curto-circuito (CC) – Pela Figura 5 pode-se observar o crescimento da gota metálica até a sua transferência a qual ocorre por curto-circuito. Como o nível de tensão é menor que no modo globular, o comprimento do arco é pequeno, o que possibilita o toque, da gota em formação, na poça de fusão, efetuando a transferência da mesma.

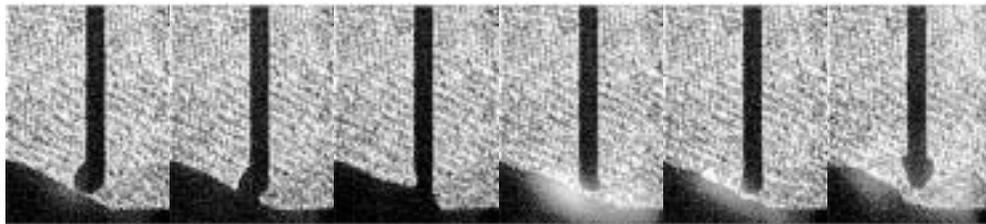


Figura 5 - Transferência metálica curto-circuito.

Transferência Globular/Curto-circuito/Goticular (GL-CC-GT) – Verificou-se nesse modo a incidência de três modos atuando seqüencialmente, em função da evolução do comprimento de arco e efeito Joule. Semelhante ao modo observado anteriormente o crescimento da gota é iniciado até o ponto em que esta toca a poça fundida e transfere-se em função do efeito de tensão superficial. No entanto, devido ao seu maior nível de corrente, após a transferência da gota o comprimento de arco aumenta bruscamente e a fusão do arame eletrodo acontece a uma taxa mais elevada, produzindo gotas mais finas e em uma maior frequência, caracterizando-se momentaneamente como goticular (Figura 6). O comprimento de arame é restabelecido em função da dinâmica de alimentação do arame eletrodo e o crescimento de uma gota maior reinicia-se.

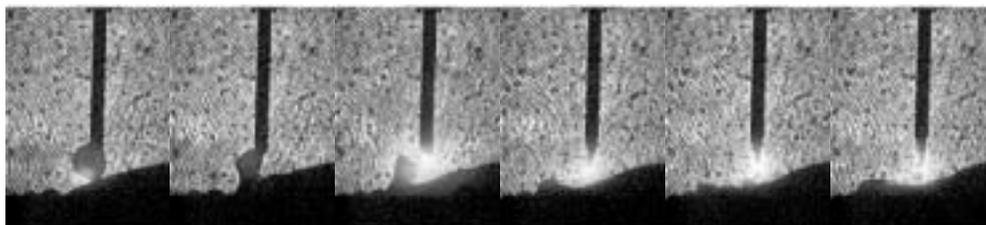


Figura 6 - Transferência metálica globular/curto-circuito/goticular.

Transferência Globular/Goticular (GL-GT) – nesse modo de transferência acontece a formação de uma gota de diâmetro superior ao do arame eletrodo e após sua transferência ocorre a formação de gotas menores. Tal fenômeno pode estar relacionado, como no modo observado

anteriormente, ao efeito Joule, e como o nível de tensão é mais elevado que o anterior, o curto-circuito não é observado. A Figura 7 retrata esse comportamento, mostrando a transferência de uma gota com um diâmetro superior ao diâmetro do arame e outra gota com diâmetro similar ao mesmo.

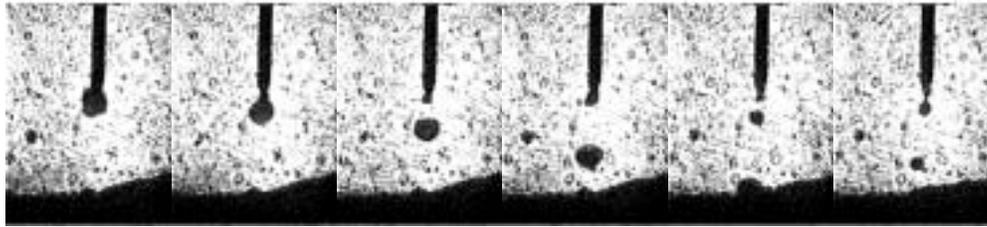


Figura 7 - Transferência metálica globular/goticular.

Transferência **Goticular com alongamento/Goticular (GTE-GT)** – nesse tipo de transferência as gotas geradas foram transferidas axialmente a uma alta frequência. Ocorreu seqüencialmente a formação de um prolongamento na extremidade livre do eletrodo a qual diminui com o consumo deste eletrodo até um limite mínimo, caracterizando-se nesse momento uma transferência goticular.

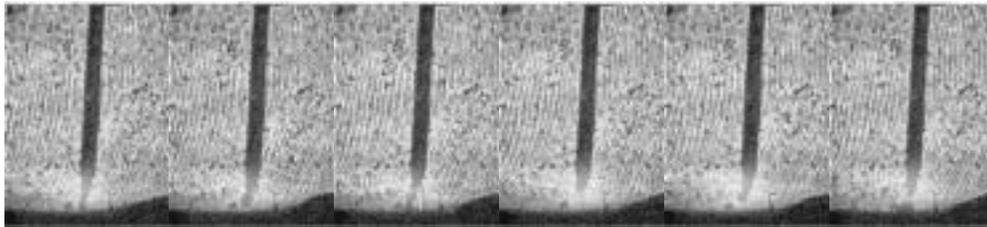


Figura 8 – Transferência Goticular com alongamento/Goticular.

Nas Figuras 9 e 10, verifica-se dois modos que ocorreram apenas na soldagem com o gás de proteção com 5% de O_2 e nas Figuras 11 e 12, apenas na soldagem com 2% de O_2 . É possível que essa diferenciação seja resultado da variação da tensão superficial com a mudança do teor de O_2 no ambiente da solda.

Transferência por **Globular/Repulsão (GL-RE)** – Segundo Stenbacka & Persson (1989) em uma soldagem, quando a corrente é aumentada, a força eletromagnética torna-se da mesma ordem de magnitude, ou mesmo maior do que a força gravitacional (em CC polaridade positiva). Se a área anódica no lado inferior da gota é pequena, ocorre uma concentração de corrente dentro da gota (densidade de corrente convergente), resultando em uma força eletromagnética ascendente que atua na gota. Além da força eletromagnética, atua também uma força no lado inferior da gota resultante da elevação da pressão do gás e do plasma. Estas forças, juntamente com a tensão superficial contrapõem-se à força gravitacional, agindo de forma a favorecer o crescimento da gota. Isso pode ser observado na Figura 9.

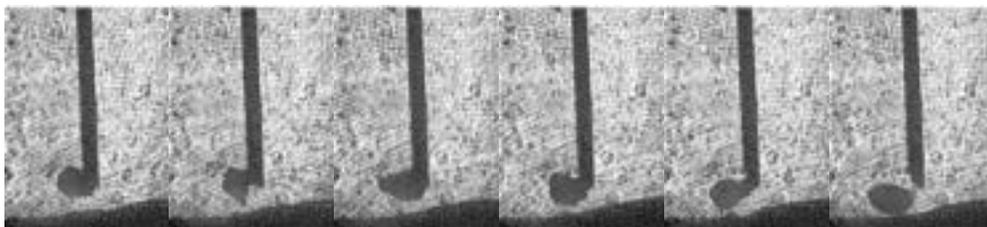


Figura 9 – Transferência metálica globular/repulsão.

Transferência metálica **goticular/repulsão (GT-RE)** – A Figura 10 apresenta a evolução desse modo de transferência a qual se podem verificar a repulsão da gota e a formação subsequente de gotas menores após o destacamento por repulsão. Similar à transferência por repulsão, mas com níveis de corrente mais elevados que na transferência por repulsão, permitindo a formação subsequente de gotas menores que o diâmetro do eletrodo.

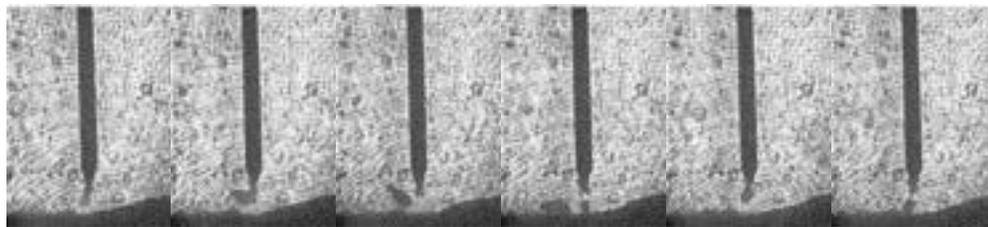


Figura 10 – Transferência metálica goticular/repulsão.

Transferência **Curto-circuito/Goticular (CC-GT)** – pela Figura 10 observa-se a transferência de uma gota em vôo livre e logo em seguida a atuação do curto-circuito. Esse comportamento assemelha-se ao observado no modo misto curto-circuito/globular, no entanto este acontece a um nível de corrente mais elevado, o que proporciona a geração de gotas menores que o diâmetro do eletrodo.

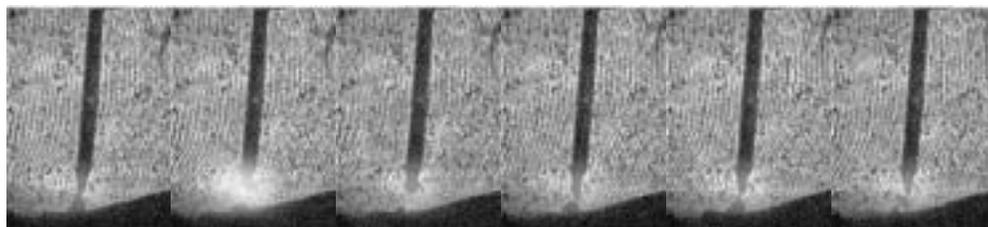


Figura 11 – Transferência metálica curto-circuito/goticular.

Transferência **curto-circuito/goticular/repulsão (CC-GT-RE)** – A Figura 12 apresenta a evolução desse modo de transferência a qual se podem verificar pequenos curtos-circuitos, a repulsão da gota e a formação subsequente de gotas menores após o destacamento por repulsão.

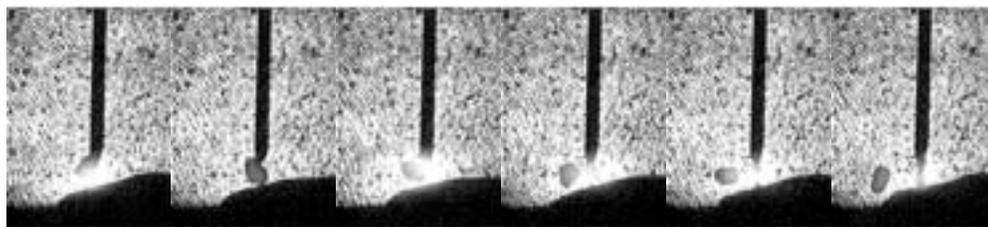


Figura 12 – Transferência curto-circuito/goticular/repulsão.

4. APRESENTAÇÃO DOS MAPAS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA

As Figuras 13 e 14 representam os mapas de transferência metálica para as soldagens realizadas. A Figura 13 foi realizado com o gás de proteção com 2% de O_2 e a Figura 14 com o gás de proteção com 5% de O_2 . Nesses mapas pode-se observar a posição de cada um desses modos de transferência, apresentados nas figuras acima.

Existe uma certa semelhança entre os mapas gerados visto que se tentou utilizar os mesmos parâmetros de soldagem para sua construção. É possível verificar que existem modos “puros” como citados em Luz ⁽⁷⁾, para ambas as soldagens. Observa-se que os modos puros

(globular, curto-circuito, goticular e goticular com alongamento) estão em regiões bem definidas em ambos os mapas. Em ambas as soldagens, foram observados 10 modos de transferência metálica distintos, isso incluindo os modos mistos.

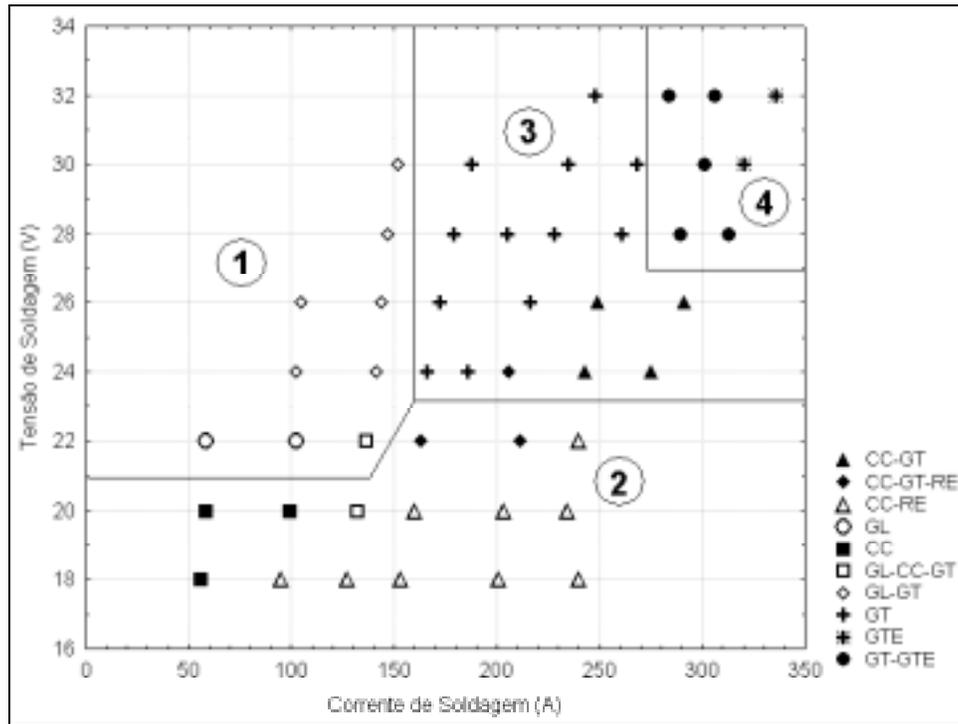


Figura 13 – Mapa de transferência para a soldagem com gás de proteção contendo 2% de O₂.

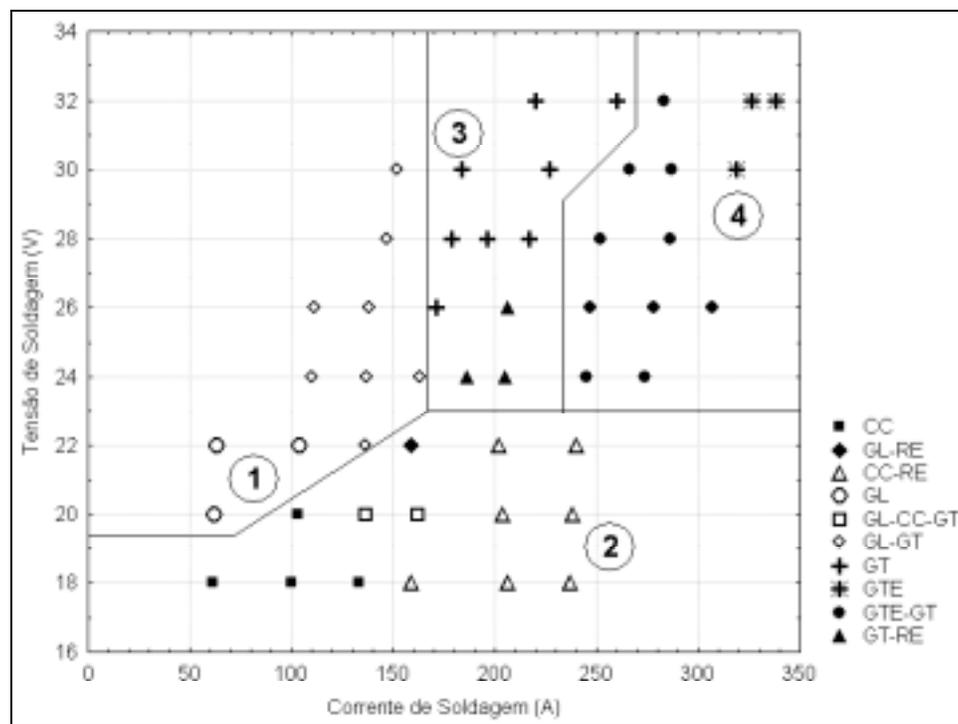


Figura 14 – Mapa de transferência para a soldagem com gás de proteção contendo 5% O₂.

Observa-se nessas figuras a distinção de quatro áreas, as quais um modo dominante (modo puro) atua com mais veemência. Na região 1 verifica-se a predominância do modo globular, a região 2 o modo curto-circuito, a região 3 o modo goticular e a região 4 o modo goticular com alongamento.

Nas figuras anteriores verifica ainda a similaridade posicional dos modos puros para ambas as soldagens (com 2% O₂ e 5% O₂). Verifica-se que eles ocorrem nas mesmas faixas de tensão e corrente (GL – 50 a 100 A e aproximadamente 22 V; GT – 150 a 250 A e de 26 a 32 V; GTE – acima de 300 A e de 30 a 32 V), muito embora se verifique a diferença em relação ao campo. Observa-se que mesmo estando posicionados em uma mesma região, a área de atuação do modo de transferência de uma soldagem para a outra se diferiu. Observando a Figura 14, constatar-se-á o aumento da zona de ocorrência do modo GTE, no entanto a diminuição do modo GT. É possível que com a inserção de uma maior quantidade de O₂ no gás de proteção, o efeito da tensão superficial tenha diminuído, proporcionando a formação de um metal menos viscoso⁽⁶⁾, contribuindo para uma transferência com maior incidência do pivotamento. Pode-se verificar isso com o aumento da região GTE-GT, o qual seria a faixa de transição entre um modo e outro. Observa-se que na soldagem com 2% O₂ (Figura 13) este campo é bem menor, aumentando bruscamente com o aumento do teor de O₂.

Já os modos mistos se diferem uns dos outros com relação à posição nos mapas de transferência. O modo CC-GL é observado em correntes de até 140 A para a soldagem com o gás de proteção com 5% O₂ enquanto na soldagem com 2% O₂ este modo só acontece para correntes de até 100 A. Outro ponto como o CC-RE a qual só é observado para correntes na ordem de 150 A para a soldagem com 5% O₂ enquanto na soldagem com 2% O₂ este começa a ocorrer em correntes abaixo de 100 A.

Segundo Norrish⁽⁹⁾, o modo de transferência goticular com alongamento (GTE) ocorreria para correntes na ordem de 300 A. Observando o mapa de transferência para a soldagem com 2% O₂ verifica-se que os pontos de ocorrência deste estão na faixa de 300 A, no entanto, quando se modifica o gás de proteção para 5% de O₂, este começa a ocorrer em correntes abaixo de 250 A. Observa-se também que existe uma diferença nas faixas de tensão, variando na ordem de 4 V de uma soldagem em relação à outra.

Outro ponto a ser observado é a maior incidência de repulsão com o aumento do teor de O₂. Pelas Figuras 13 e 14, verifica-se que esse modo está presente em regiões mais elevadas em relação à tensão de soldagem para teores maiores de O₂. É possível que com a maior fluidez do metal fundido, este seja mais influenciado pelas forças eletromagnéticas, como cita Stenbacka & Persson⁽¹⁰⁾, já que se está soldando em corrente constante em polaridade positiva.

5. CONCLUSÕES

Com relação ao estudo mais detalhado dos modos de transferência metálica de um arame tubular com a variação do gás de proteção pode-se concluir que:

- os mapas para esses consumíveis apresentaram modos bem definidos, gerando regiões distintas nesses mapas.
- a principal diferença está na aparição de um maior campo de repulsão na soldagem com o aumento do teor de O₂ no gás de proteção.
- os campos de transferência principais (“puras”) mantêm-se alocados nos mesmos pares de tensão e corrente de trabalho.
- devido ao aumento de O₂ alguns campos foram expandidos, conseqüentemente reduzidos alguns, como o caso do modo GT e GTE-GT.

6. AGRADECIMENTOS

Agradece-se à FEMEC/UFU, ACESITA, ESAB e ao CNPq pelo apoio institucional e financeiro para a realização do trabalho.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Brandi, S. D., “Soldagem dos Aços Inoxidáveis”, 1997.
2. Waszink, J. H.; Graat, L. H. J.: Welding Journal. 62 108s-116s, 1983
3. Essers, W. G.; Walter, R. Welding journal 60 37s-42s, 1981.
4. Lin, Q.; Li, X.; Simpson, W.: Metal transfer measurements in gas metal arc welding. J. Phys.D: Appl. Phys. 34, 347-353, 2001.
5. Modenesi, J. P.: Introdução à Física do arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais, Departamento de Engenharia de Metalúrgia, UFMG, 1995.
6. Scotti, A.: Mapping transfer modes for stainless steel gas metal arc welding. Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 5, Nº 4, 2000.
7. Luz, T. S.; Rodrigues, C. E. A. L.; Ferraresi, V. A.; Farias, J. P.: “Análise da transferência metálica do arame tubular em comparação ao arame sólido.” CONEM, Belém, PA. 2004.
8. Maia, T.C.G., "Processamento de Imagens de Transferência Metálica em Soldagem a Arco Voltaico", Dissertação de Mestrado, Faculdade de Eng. Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, 2001.
9. Norrish, J. and Richardson, I. F.: Metal Transfer Mechanisms, Welding & Metal Fabrication, 17-22pp, 1988.
10. Stenbacka, N.; Persson, K. A.: Shielding Gases for Gas Metal Arc Welding, Welding Journal, AWS, November 1989, 41-47pp, 1989.

METAL TRANSFER ANALYSIS OF FLUX CORED ARC WELDING

Temístocles de Sousa Luz

Rua João XXIII, 765 – CEP 38408-056, Santa Maria, Uberlândia-MG, tsluz@mecanica.ufu.br

Valtair Antonio Ferraresi

LAPROSOLDA. Campus Santa Mônica, Bloco 10, Uberlândia MG, valtairf@mecanica.ufu.br

Paulo Sergio. S. Balsamo

Praça 1º de maio, 09 – CEP 35180-018, Centro, Timoteo MG, pbalsamo@acesita.com.br

Abstract: *The knowledge of metal transfer modes provides a better process control and more efficiency automation during the welding. A large set of data is available on the current literature regardless the metal transfer modes in solid GMAW wires. However, the same amount of data is not available for tubular wires and more detailed identification of transfer modes during the FCAW process is necessary. Thus, the aim of this work was to obtain the metal transfer map of a commercial tubular wire (Tubrod 410Ti) and assess the shielding gas influence (Ar+2%O₂ and Ar+5%O₂) on the metal transfer. A high-speed filming system was employed in addition to a laser head and a set of optical filters to provide the image recording of the electrode, droplets and bead shadows (this experimental rig is known as Shadowgraph or Backlight technique). It was possible to thoroughly assess the metal transfer modes of the tubular wire.*

Key words: *metal transfer, welding, tubular wire.*