



## VERIFICAÇÃO DA POSSIBILIDADE DE IDENTIFICAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA METÁLICA NO PROCESSO MIG/MAG PULSADO ATRAVÉS DE UM SENSOR ÓPTICO

### **Hélio Cordeiro de Miranda\***

Dr. Prof./pesquisador – ENGESOLDA - UFC, Universidade Federal do Ceará - DEM  
Campus do Pici – Bloco 714 – CEP.: 60455-760 – Fortaleza - CE. E-mail: hmiranda@ufc.br.

### **Valtair Antonio Ferraresi**

Dr. Eng., Prof./pesquisador - LAPROSOLDA - UFU, Universidade Federal de Uberlândia - FEM  
Campus Santa Mônica – 38400-902 – Uberlândia - MG. E-mail: valtairf@mecanica.ufu.br.

**Resumo.** *Este trabalho tem o objetivo de verificar a possibilidade do emprego de um sensor óptico na construção de um dispositivo de identificação da transferência metálica, no processo MIG/MAG pulsado, com baixo custo e boa flexibilidade. Utilizou-se um fotodiodo de silício como sensor óptico e uma interface eletrônica para transformar a tensão gerada em um sinal compatível com o processamento computacional. A soldagem pulsada, em aço comum baixo carbono, foi realizada automaticamente na posição plana empregando uma fonte eletrônica multiprocesso. A transferência metálica foi filmada por meio de uma câmera de alta velocidade com a finalidade de validar a identificação pelo dispositivo proposto. Os sinais do sensor, da filmadora, da tensão e da corrente de soldagem foram sincronizados para garantir uma análise adequada. Os resultados mostraram que é possível o emprego deste tipo de sensor na identificação da transferência metálica com boa confiabilidade para o aço, tornando possível a sua utilização na otimização do processo de soldagem MIG/MAG pulsado.*

**Palavras-chave:** *Transferência metálica, MIG/MAG pulsado, Sensor óptico.*

## **1. INTRODUÇÃO**

O processo MIG/MAG é um dos processos mais utilizados nas indústrias, principalmente em virtude de apresentar alta produtividade, boa qualidade de solda e custo moderado. Este processo apresenta basicamente três tipos de transferência metálica: curto-circuito, globular e goticular. A transferência por curto-circuito permite a soldagem de chapas finas e em qualquer posição de soldagem, mas sua produção é baixa e normalmente gera grande quantidade de respingos. A transferência globular limita a soldagem à posição plana e gera grande quantidade de respingos, fazendo com que não seja muito desejada neste processo. A transferência goticular proporciona alta estabilidade do arco com transferência regular de gotículas, resultando em soldas com boas propriedades e acabamento superficial elevado, contudo, requer corrente de soldagem elevada (superior a corrente de transição globular/goticular), o que dificulta a soldagem de chapas finas e fora da posição plana.

Com o intuito de conciliar as vantagens da transferência por curto-circuito com as da transferência goticular, foi implementado o processo MIG/MAG pulsado, o qual utiliza um nível inferior (corrente de base) e um nível superior (corrente de pulso) de corrente em tempos determinados (tempo de base e de pulso), para produzir uma transferência goticular associada a uma corrente média mais baixa. Desta forma, o processo MIG/MAG pulsado possibilita a soldagem de chapas finas e em todas as posições, com estabilidade e acabamento superficial elevados.

No entanto, para se atingir as características citadas acima, é preciso que os parâmetros de soldagem sejam ajustados adequadamente para produzir a transferência de uma gota por pulso – UGPP (Subramanian, 1996). A condição UGPP é, em termos de estabilidade, a mais desejada no MIG/MAG pulsado, a qual pode ser obtida principalmente pelo correto ajuste das seguintes variáveis: corrente de pulso ( $I_p$ ), corrente de base ( $I_b$ ), tempo de pulso ( $t_p$ ), tempo de base ( $t_b$ ), velocidade de alimentação do arame eletrodo (VALIM) e distância bico de contato peça (DBCP).

A constatação da condição UGPP é difícil de ser realizada em virtude dos sinais de tensão e de corrente não fornecerem um indicativo considerável do momento da transferência metálica tipo goticular. Em muitos casos, o ajuste é realizado empiricamente, observando a estabilidade do arco e o acabamento superficial do cordão de solda. Entretanto, este artifício é muito trabalhoso, exigindo um número elevado de experimentos, e nem sempre a condição de UGPP é atingida. A técnica mais precisa é a filmagem de alta velocidade da transferência metálica, porém o equipamento utilizado para realizar tal filmagem apresenta custo elevado, tornando-se inacessível para a maioria dos usuários de soldagem.

Para superar estas dificuldades, foi proposto (Pandey et al., 1995 e Wang & Li, 1997), a utilização de sensores e/ou técnicas de análise para identificar o momento da transferência metálica. Pode-se citar como exemplos, os sensores baseados no som e da luminosidade do arco de soldagem e também, a técnica de análise estatística dos sinais de tensão e corrente de soldagem (Siewert et al., 1997). Os sensores baseados no som e a técnica de análise dos sinais de tensão e corrente de soldagem, além de menor sensibilidade, são métodos indiretos, que utilizam técnicas estatísticas e numéricas para realizar essa classificação, o que implica em um maior tempo de processamento e maior complexidade de análise. Para o som, acrescenta-se ainda o elevado ruído existente em ambientes de soldagem (Saini & Floyd, 1998).

Por sua vez, acredita-se que a identificação da transferência metálica por meio de sensores ópticos seja bastante viável em virtude da boa sensibilidade às variações luminosas, facilidade de análise e baixo custo do dispositivo (Wang et al., 1994 e Wang & Li, 1997). Na soldagem, pode-se atribuir a variação luminosa do arco principalmente pela alteração da corrente de soldagem (quanto maior a corrente maior será a luminosidade) e pela alteração no comprimento do arco (quanto menor o comprimento do arco menor será a luminosidade).

Se o dispositivo óptico mostrar eficiência, é possível fazer os ajustes dos parâmetros de soldagem, para se obter a condição UGPP, baseados no sinal do sensor de luminosidade sem necessidade de uma filmadora de alta velocidade (elevado custo e menor flexibilidade). Portanto, propõe-se neste trabalho a verificação da possibilidade da utilização do sensor óptico na identificação da transferência metálica goticular no processo MIG/MAG pulsado para soldagem de aço.

## **2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

Para identificação da transferência metálica foi utilizado um sensor óptico do tipo fotodiodo de silício montado em circuito eletrônico desenvolvido especificamente para este fim. A comprovação da sensibilidade do sensor foi realizada através da filmagem de alta velocidade utilizando uma técnica denominada de “shadowgrafia”. Esta técnica consiste em utilizar uma fonte de laser em baixa potência sobre o arco, de maneira que através de um filtro de banda passa baixo, somente o comprimento de onda do sinal de laser passa pelo mesmo, formando uma espécie de sombra com o perfil do arco, do eletrodo e da gota. Isto permite a filmagem em alta velocidade da transferência metálica e da região do arco. Esta técnica vem sendo extensivamente utilizada com sucesso no LAPROSOLDA-UFU. A sincronização dos sinais do sensor, da filmadora e da tensão e corrente de soldagem foi realizada de acordo com técnica desenvolvida no LAPROSOLDA e com comprovação já publicada (Bálsamo et al., 2000 e Vilarinho, 2000). A Figura 1 ilustra esquematicamente a bancada experimental com os componentes utilizados neste trabalho.

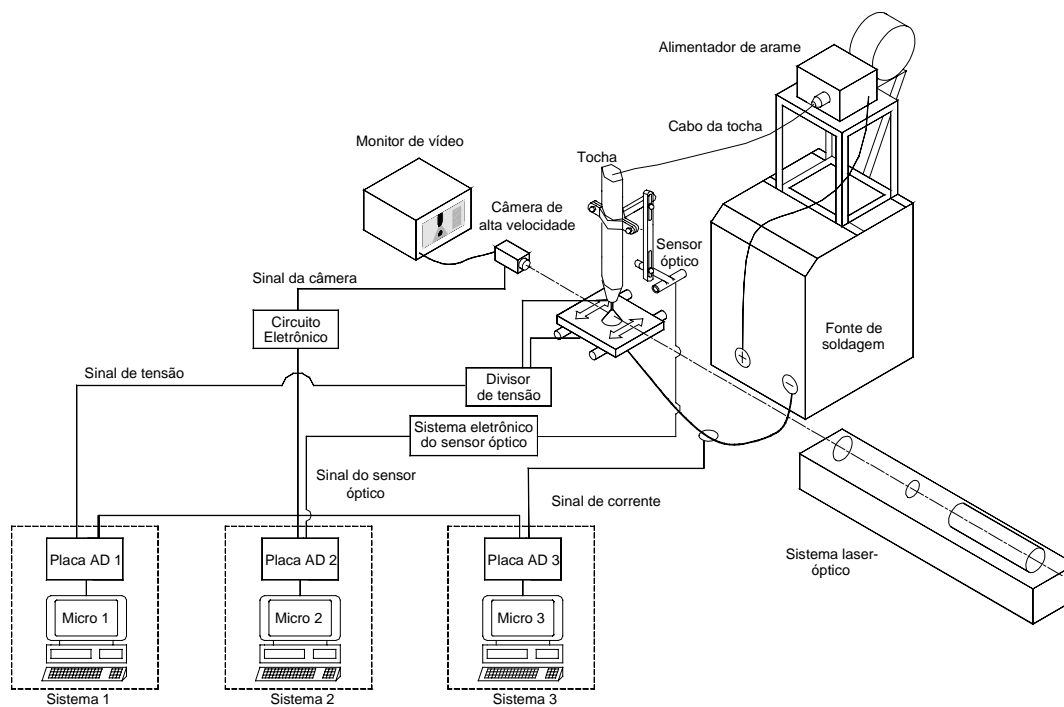


Figura 1 – Bancada experimental utilizada.

Com relação ao sensor óptico, destaca-se que foram realizados vários ensaios para ajustar o sensor óptico às condições adversas existentes na soldagem, tais como elevada temperatura e alta intensidade luminosa incidente. Neste sentido, foi construído um suporte cerâmico que se encontra ilustrado esquematicamente na Fig. 2. O sensor foi alojado no interior de um cilindro de sílica, denominado de suporte principal. A sílica tem a função de proteger o sensor das altas temperaturas e dos respingos provenientes da soldagem. O sensor é preso no interior do cilindro por meio de um fixador e a frente do mesmo é alojado um filtro luminoso (igual ao utilizado em mascaras protetoras comuns de soldagem). O objetivo deste filtro é reduzir a intensidade luminosa a níveis adequados ao sensor óptico. O recuo de 22 mm da posição do filtro é indicado para reduzir a possibilidade do contato do filtro com respingos de solda.

Além disso, foram consideradas suas características de posicionamento e as características eletrônicas do circuito, com a finalidade de evitar a saturação do sinal do sensor e a perda da sensibilidade. Normalmente, um bom posicionamento exige que o sensor esteja apontado para o arco de soldagem a uma distância média de 40 mm em relação ao arco e à superfície do corpo de prova.

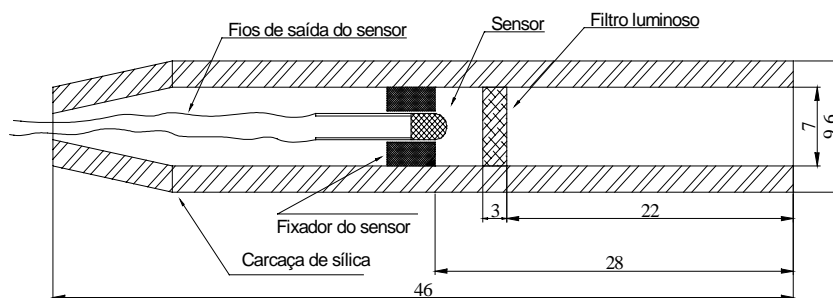


Figura 2 - Detalhes internos do suporte do sensor óptico.

## 2.1. Experimentos Realizados

Apesar de vários ensaios terem sido realizados, neste trabalho só serão considerados os representativos das condições em que se transfere uma gota (UGPP), mais de uma gota (+ UGPP) e menos de uma gota por pulso (- UGPP). Na realização destes ensaios, empregou-se uma fonte de soldagem eletrônica multiprocesso, com soldagens automáticas de simples deposição na posição plana. Manteve-se constante a DBCP em 18 mm, a velocidade soldagem em 25 cm/min e a distância (L) da ponta do sensor ao arco m 40 mm. Foram utilizados arame de aço de 1,2 mm de diâmetro e gás de proteção argônio com 5 % CO<sub>2</sub>, com vazão de 11 l/min. As condições de soldagens que foram modificadas se encontram descritas na Tab. 1.

Tabela 1 – Parâmetros de soldagem utilizados.

Ensaio	Ip (A)	tp (ms)	Ib (A)	tb (ms)	VALIM (m/min)
1	250	5,0	100	10,0	3,5
2	260	4,9	70	10,0	3,2
3	280	4,5	80	10,0	3,5
4	300	2,0	70	10,0	2,7
5	300	6,0	70	10,0	4,2

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando que a alteração da luminosidade do arco durante o destacamento deve concentrar a análise principal deste trabalho, os resultados dos ensaios realizados (a exceção do Ensaio 1) serão explorados apenas com o sinal do sensor óptico e as imagens da transferência metálica para validação.

A Figura 3 ilustra, a título de verificação do sistema de sincronização, os sinais do sensor óptico, da tensão e da corrente de soldagem junto com o sinal vertical da filmadora para o Ensaio 1. A primeira curva se refere à tensão de soldagem, a segunda ao sinal do sensor e a terceira à corrente de soldagem. Percebe-se por esta figura, que nas linhas verticais, perpendiculares a cada curva, encontram-se dispostos os números correspondentes a cada imagem da transferência, conforme será visto mais adiante.

Observa-se que com a alteração da corrente da base para o pulso, o sinal do sensor aumenta, em virtude do acréscimo de luminosidade do arco provocado pela maior corrente incidente. Por estas curvas também é possível mostrar uma maior sensibilidade nos sinais do sensor quando comparados ao sinal da tensão de soldagem no momento do destacamento.

Um detalhe da curva do sensor óptico para as condições do Ensaio 1, com suas respectivas imagens, é mostrado na Fig. 4. Verifica-se que no momento do destacamento, ocorre uma alteração considerável no sinal do sensor, resultados estes que estão de acordo com Wang et al. (1994) e Wang & Li (1997). Primeiro o sinal cai, para depois, no instante do destacamento, aumentar de valor. Isto porque, no pulso, durante a formação da gota, o comprimento do arco diminui basicamente em virtude de dois fatores: aumento do diâmetro da gota e alongamento da região de transição entre a gota fundida e o eletrodo (também chamado de “empescoçamento”). Desta forma, o efeito do ciclo da transferência da gota sobre a luminosidade do arco pode ser resumido da seguinte forma:

- ◆ aumento de luminosidade devido à mudança de corrente da base para o pulso;
- ◆ redução e aumento de luminosidade durante o pulso em virtude do “empescoçamento” e destacamento da gota;
- ◆ redução da luminosidade pela mudança da corrente de pulso para base.

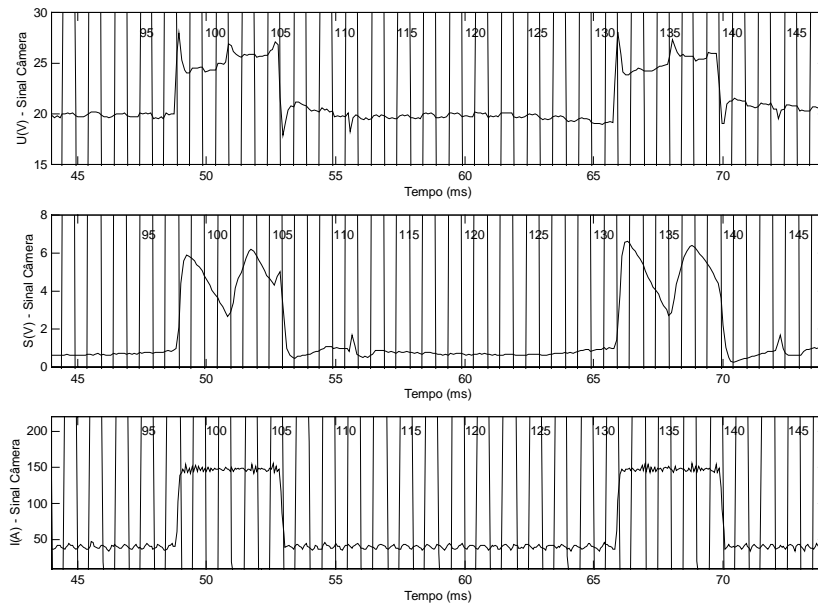


Figura 3 - Oscilogramas sincronizados dos sinais da filmadora, do sensor óptico, da tensão e corrente de soldagem.

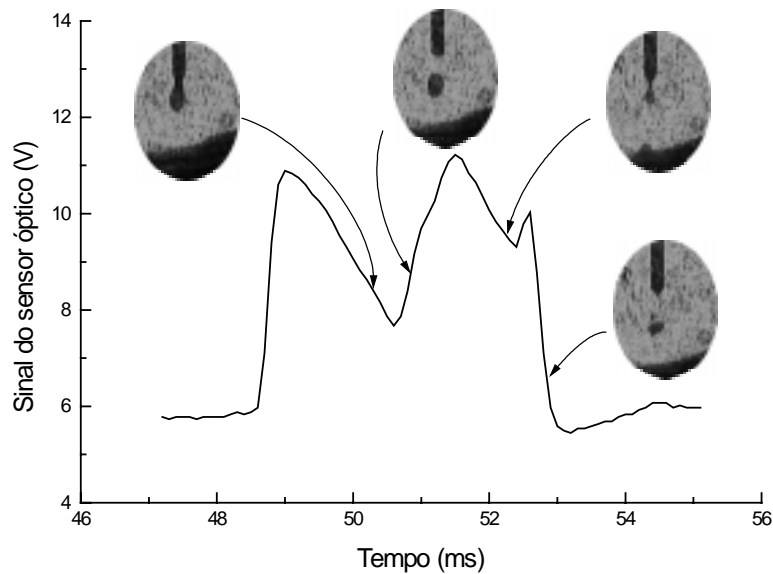


Figura 4 – Detalhe do sinal do sensor óptico mostrando o destacamento de mais de uma gota por pulso (Ensaio 1).

A Figura 5 mostra o sinal do sensor óptico com as respectivas imagens da transferência metálica para o Ensaio 2. Por meio desta, observa-se que foi transferida apenas uma gota a cada pulso e que o sinal do sensor sofreu alterações significativas durante o ciclo de destacamento (sendo caracterizado pela forma de “V” na maioria dos pulsos). Em todos os pulsos, o destacamento da gota provoca uma oscilação no sinal do sensor óptico, primeiro com uma pequena queda para depois ter um aumento súbito, imediatamente antes do destacamento da gota.

Na análise da transferência da gota na fase de pulso, destaca-se que no início da formação, o arco permanece na parte inferior da gota e a medida que a mesma cresce, o comprimento do arco

não sofre obrigatoriamente alteração, pois é possível que a relação de fusão da gota seja temporariamente diferente da Valim. Isto implica que o sinal luminoso (proporcional ao comprimento do arco) antes do destacamento pode ser alisado ou apresentar alteração significativa (diminuição na maioria das vezes). Entretanto, após o destacamento ocorre normalmente um aumento considerável do comprimento do arco, proporcional ao tamanho da gota destacada e que reflete num aumento da sua luminosidade.

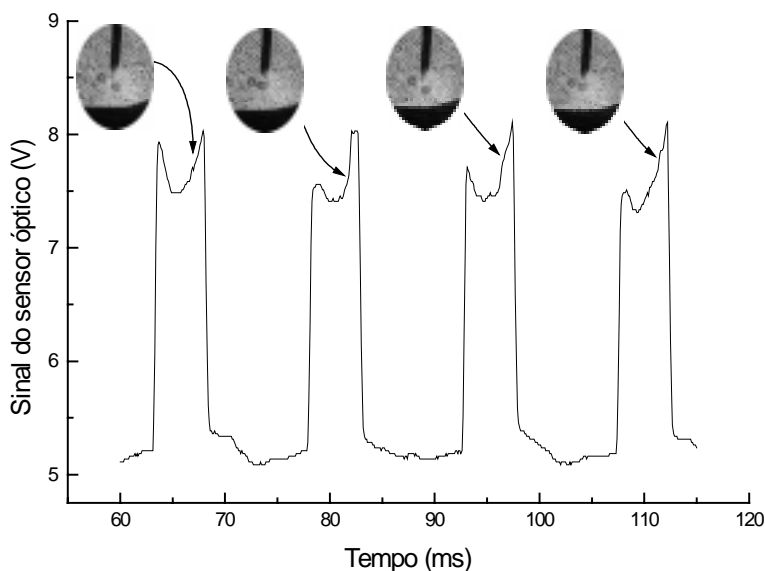


Figura 5 - Ilustração do sinal do sensor óptico mostrando a transferência metálica de uma gota por pulso com o destacamento ocorrendo do meio para o final do pulso (Ensaio 2).

O Ensaio 3 proporcionou uma situação instável de transferência metálica, em que a gota foi transferida na condição de UGPP, porém o instante do destacamento ocorreu tanto na fase de base quanto na fase de pulso. Conforme pode ser verificado pela Fig. 6, o sinal do sensor óptico comprovou o que foi dito acima, ou seja, antes do destacamento não ocorre obrigatoriamente uma alteração do sinal do sensor óptico. Comparando o sinal do sensor óptico, na fase que antecede o destacamento dos dois pulsos apresentados nesta figura, constata-se que realmente a forma inicial difere qualitativamente e quantitativamente.

A explicação para a diferença pode ser feita a partir da afirmação de que este ensaio representa uma condição instável e por isso é possível que ocorra destacamento na fase de pulso e na fase de base. Isto provoca o aparecimento de trechos de transição, em que uma gota não é totalmente destacada num pulso, acumulando material para o próximo ciclo e provocando diferenças na luminosidade do arco entre os destacamentos. Observando as imagens da Fig. 6, percebe-se que a primeira gota destacada é inferior a segunda e que esta última é transferida mais rapidamente no pulso, devido ao material acumulado no ciclo anterior.

Como já existe um material fundido (remanescente do pulso anterior) no início da aplicação do segundo pulso, a luminosidade deste nesta fase é menor que a do primeiro pulso e não ocorre alteração significativa do arco em virtude da dinâmica do destacamento ser diferente (o arco tende a subir pela superfície da gota ao mesmo tempo que esta cresce).

Quando a gota não é transferida no pulso, não ocorre alteração significativa no sinal do sensor óptico, ou seja, não existe uma alteração com alto gradiente deste sinal. Um exemplo deste tipo de fenômeno é mostrado na Fig. 7, que também corresponde ao Ensaio 3. A ausência de uma alteração mais significativa quando a gota é destacada na base é justificada através de dois pontos. O primeiro é que o circuito do sensor óptico foi ajustado para máxima sensibilidade na fase de pulso e por isso a sensibilidade do mesmo seria menor na fase de base. O segundo ponto, no qual os autores

acreditam ser o principal motivo, é que a gota para ser destacada na fase de base, requer que a força devido a aceleração obtida na fase de pulso supere a força devido a tensão superficial quando o nível de corrente for reduzido. Isto faz com que no momento final do pulso (gota acelerada para a poça e com empescoçamento) o arco atinja a região de empescoçamento (passando para cima da superfície inferior da gota) e que no momento inicial da base, exista uma força de retenção da tensão superficial, puxando a gota e desacelerando a mesma, mas não o suficiente para evitar seu destacamento. Este destacamento, por sua vez, não provoca alterações significativas no comprimento do arco.

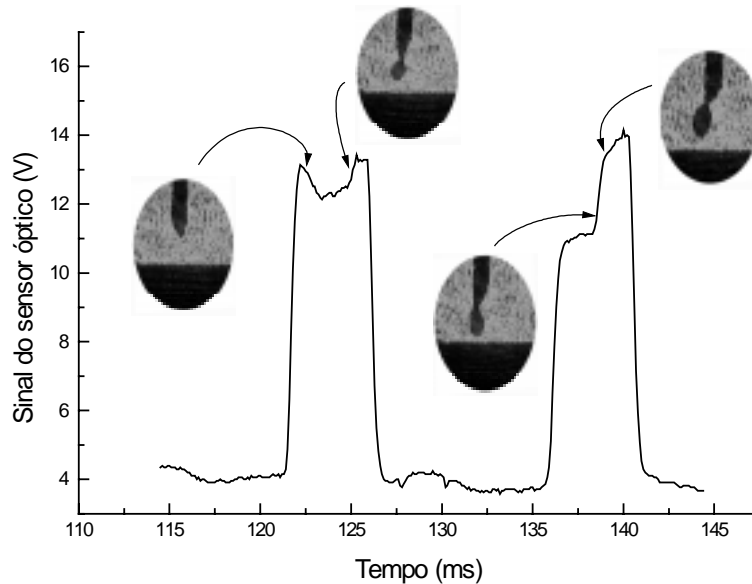


Figura 6 - Detalhe do sinal do sensor mostrando o momento do destacamento no pulso (Ensaio 3).

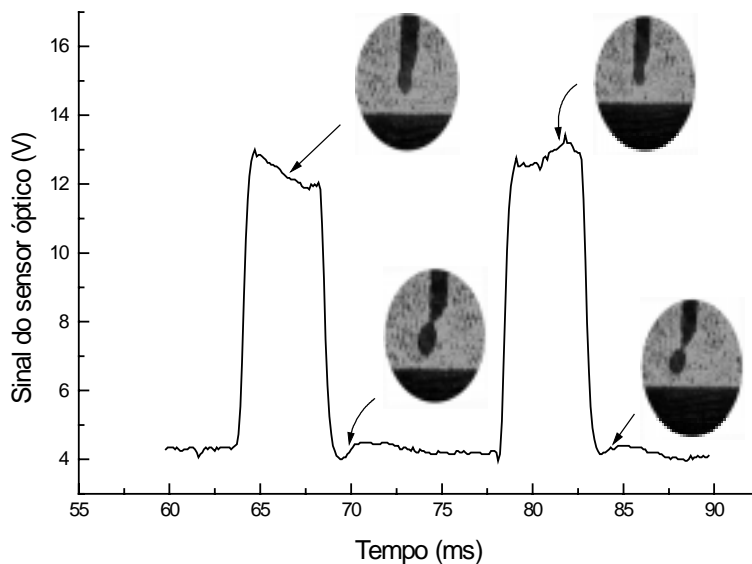


Figura 7 - Detalhe do sinal do sensor óptico mostrando o destacamento da gota na base (Ensaio 3).

Salienta-se ainda que independente da condição de UGPP, o sinal do sensor óptico é mais influenciado pela corrente de soldagem que pelo comprimento do arco. Esta característica pode, conforme será visto adiante, mascarar o destacamento da gota em algumas situações. Esta afirmação é baseada no fato de que durante o pulso a corrente é mantida constante e por isso as

alterações no comprimento do arco relacionadas ao destacamento da gota são detectadas, mas para transferência ocorrendo na transição do pulso/base, a modificação do nível de corrente é mais representativa na luminosidade que as alterações provenientes do destacamento da gota.

Na condição de transferência metálica de menos de uma gota por pulso, constatou-se que o sinal do sensor não obedece a uma mesma tendência independente do diâmetro do arame. Os sinais apresentam amplitudes e formas diferentes, de modo que o pulso em que não ocorre destacamento apresenta uma forma alisada, com inclinação ora à direita ora à esquerda. Este fato caracteriza uma lógica inversa de análise, estabelecida no fato de que quando não há alterações consideráveis no pulso (formato “V” não observado) é porque não houve destacamento no mesmo. A Figura 8 representa uma condição de menos de uma gota por pulso obtida pelo Ensaio 4. Nesta figura, a imagem representa a única gota transferida nos quatro pulsos apresentados, mostrando claramente que a condição é de –UGPP. Caso não existisse a imagem da gota, poderia se chegar a esta mesma conclusão observando apenas o sinal do sensor óptico, pois a forma deste sinal mostra que os pulsos não possuem o formato tipo “V” e apresentam amplitudes e inclinações diferentes (comparar a forma do primeiro pulso com os demais).

Chama-se atenção em um ponto: quando a condição é de –UGPP, pode-se a partir do sinal do sensor óptico afirmar que a soldagem ocorre com transferência de –UGPP, mas nem sempre é possível determinar onde ocorreu o destacamento da gota, já que quando a transferência é na base, o sinal não apresenta o padrão tipo “V” ou semelhante.

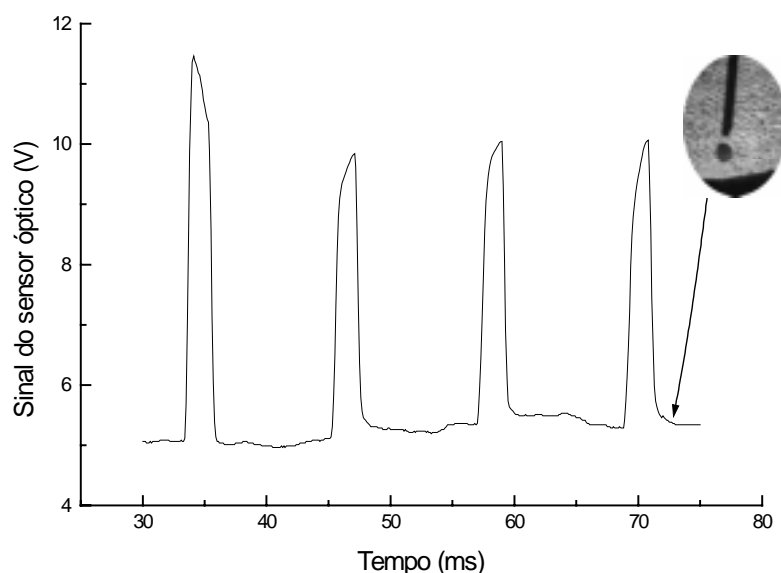


Figura 8 - Ilustração do sinal do sensor óptico para a transferência de menos de uma gota por pulso (Ensaio 4).

A Figura 9 mostra um trecho do sinal do sensor óptico para soldagem em aço, com transferência de mais de uma gota por pulso (Ensaio 5). Visualiza-se que houve a transferência de duas gotas em cada pulso. O sinal do sensor apresentou uma redução seguida de aumento para a primeira gota destacada e apenas uma redução na transferência da segunda gota. Isto ocorre porque na fase final do pulso, quando a gota está para ser destacada, a redução da corrente mascara o efeito da oscilação do comprimento do arco e do empescoçamento. Com isso, o aumento característico do sinal do sensor óptico logo após o destacamento é suprimido para a transferência da segunda gota (que ocorre no final do pulso). Este aumento pode vir precedido ou não de uma queda no sinal do sensor. Contudo, pelos experimentos realizados, a observação da transferência metálica indica que quando ocorre uma queda do sinal no final do pulso sem que ocorra o aumento, é porque houve a transferência de uma gota ou gotícula na transição pulso/base. Conforme já foi dito, isto é



justificado pelo efeito combinado da diminuição da luminosidade em função da redução da corrente.

No geral, foi verificado que o comportamento do sinal do sensor óptico para transferência de mais de uma gota por pulso é caracterizada pela forma serrilhada com mais de um vale e pelo menos um pico. De maneira que, utilizando apenas o sinal do sensor óptico, pode-se afirmar que a condição é de +UGPP quando forem observadas estas características.

#### 4. CONCLUSÕES

- ◆ É necessário ajustar adequadamente as características de posicionamento e as características do circuito eletrônico para se ter um bom funcionamento do sensor óptico na identificação da transferência metálica.
- ◆ O sensor óptico foi capaz de identificar o destacamento da gota no aço para diferentes condições de transferência metálica (uma gota, mais de uma gota no pulso).
- ◆ Quando a transferência da gota ocorre na transição pulso/base o sensor não teve sensibilidade de identificação devido ao efeito combinado de redução da luminosidade pela diminuição da corrente.
- ◆ Para condição de -UGPP é possível realizar a classificação da transferência, mas nem sempre se consegue estabelecer o instante do destacamento.
- ◆ O dispositivo de identificação do destacamento da gota utilizando o sensor óptico mostrou ser capaz de classificar adequadamente a condição de transferência no MIG/MAG pulsado.

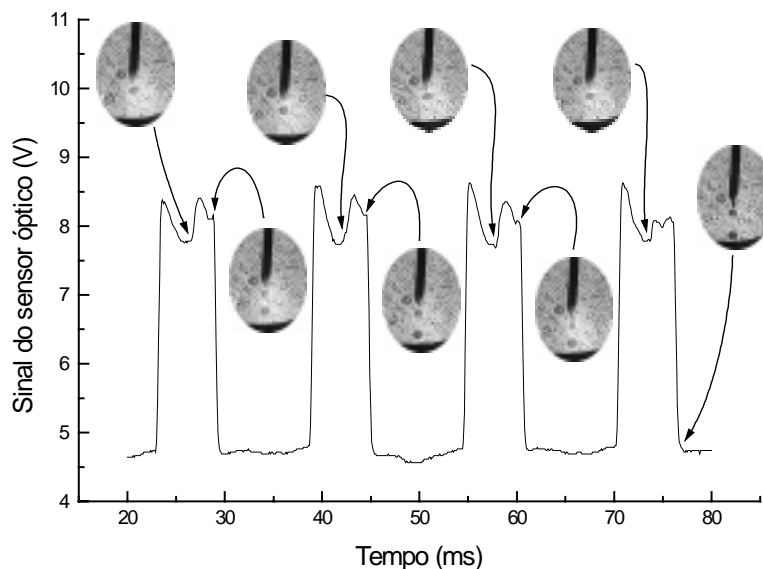


Figura 9 - Ilustração do sinal do sensor óptico para a transferência de mais de uma gota por pulso (Ensaio 5).

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao LAPROSOLDA – UFU, à White Martins e à CAPES pelo apoio laboratorial e suporte financeiro e ao Eng. Márcio Vilela pelo auxílio na construção do sistema eletrônico do dispositivo de fixação.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bálsamo, P.S.S., Vilarinho, L.O. e Scotti, A., 2000, “Determinação Criteriosa dos Parâmetros de Pulso para Soldagem MIG Pulsada em Alumínio e Aço Inoxidável”, Revista Soldagem & Inspeção - Suplemento Técnico, Maio, ano 6, n.º 2, pp. 1-9.
- Pandey, S.; Rao, U. R. K.; Aghakhani, M., 1995, “Metal Transfer and V-I Transients in GMAW of Aluminium”, Trends in Welding Research, Proceedings of the 4th International Conference, pp. 385-397.
- Saini, D.; Floyd, S., 1998, “An Investigation of Gas Metal Arc Welding Sound Signature for On-Line quality Control”, Welding Journal, April, pp. 172s- 179s.
- Siewert, T. A.; Madigan, R. B.; Quinn, T. P., 1997, “Sensors – Control Gas Metal Arc Welding”, Advanced Materials & Processes, Vol. 4, pp. 23-25.
- Subramaniam, S., 1996, “Process Modeling and Analysis for Pulsed Gas Metal Arc Welding of na Aluminum Automotive Spaceframe”, Dissertation, West Virginia University, 227 pp.
- Vilarinho, L. O., 2000, “Desenvolvimento e Avaliação de um Algoritmo Alternativo para Soldagem MIG Sinérgica de Alumínio”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia – Uberlândia – MG, 111 pp.
- Wang, Q. L.; Zhang, L.; Jiang, W. Y., 1994, “A New Close-Loop Droplet Transfer Control System in the Pulsed GMAW”, Welding in the World, Vol. 34, pp. 217-226.
- Wang, Q. L.; Li, P. J., 1997, “Arc Light Sensing of Droplet Transfer and its Analysis in Pulsed GMAW Process”, Welding Journal, November, pp. 458s-469s.

## POSSIBILITY VERIFICATION OF METAL TRANSFER IDENTIFICATION IN THE PULSED GMAW THROUGH OPTICAL SENSOR

### **Hélio Cordeiro de Miranda**

M. Sc., PhD student - LAPROSOLDA - UFU, Uberlandia Federal University- FEM  
Campus Santa Mônica – 38400-902 – Uberlândia - MG. E-mail: hcmiranda@mecanica.ufu.br.

### **Valtair Antonio Ferraresi**

Dr. Eng., Teacher/researcher - LAPROSOLDA - UFU, Uberlandia Federal University- FEM  
Campus Santa Mônica – 38400-902 – Uberlândia - MG. E-mail: valtairf@mecanica.ufu.br.

**Abstract.** *This work is aimed to verify the possibility of the use of an optical sensor to build an identification metal transfer device, with low costs and high flexibility, in pulsed GMAW. A silicon photodiode and an electronic interface capable to detect this arc light flux were employed. The automated welding pulsed was conducted in low carbon steel, using an electronic power source. The metal transfer was recorded by high-speed camera to validate the device efficiency. The voltage and current welding signals, as well as, the optical sensor and camera signal were synchronized to guarantee suitable analysis. The obtained results showed that the device is suitable to be used for metal transfer identification with good performance in low carbon steel. Thus, it is possible to assert that the developed device is a powerful tool, which would be applied in optimization of pulsed GMAW welding.*

**Keywords:** *Metal transfer, Pulsed GMAW welding, Optical sensor.*