

# COMPARAÇÃO ENTRE OS PROCESSOS RSW CORRENTE ALTERNADA E MÉDIA FREQUENCIA CONTÍNUA VIA FILMAGEM EM ALTA VELOCIDADE

## **Marco Antonio Wolff**

Graduando, Universidade Federal de Uberlândia, Laprosolda, Campus Santa Mônica, 38400-032.  
[mawolff@mecanica.ufu.br](mailto:mawolff@mecanica.ufu.br)

## **José Enrique Vargas**

Eng. MSc, Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, 70910-900.  
[jevargas@hotmail.com](mailto:jevargas@hotmail.com)

## **Sadek C. Absi Alfaro**

Prof. PhD., Universidade de Brasília, Graco, Campus Darcy Ribeiro, 70910-900.  
[sadek@unb.br](mailto:sadek@unb.br)

## **Louriel Oliveira Vilarinho**

Prof. Dr., Universidade Federal de Uberlândia (Laprosolda), Campus Santa Mônica, 38400-032.  
[vilarinho@mecanica.ufu.br](mailto:vilarinho@mecanica.ufu.br)

**Resumo:** *O processo de soldagem por resistência é largamente utilizado na indústria automobilística, apresentando uma alta produtividade (acima de 30 soldas por minuto) e uma boa qualidade nas soldas produzidas. A introdução da soldagem de aços galvanizados, no entanto, trouxe alguns problemas à seleção dos parâmetros do processo. Aliado a isto, há a tendência da indústria em substituir as máquinas AC (corrente alternada) por máquinas MF (corrente contínua média frequência), sob a justificativa de melhor desempenho. Desta forma, este trabalho tem por objetivo observar, com o auxílio de filmagem em alta velocidade, a formação e o crescimento da lentilha de solda para as soldagens AC e MF, para diferentes configurações de chapas galvanizadas. As filmagens indicaram que a soldagem MF apresenta vantagens do ponto de vista de uniformidade do ponto formado e a soldagem AC apresenta a pulsação da lentilha em 60 Hz.*

**Palavras Chave:** *Soldagem por Resistência, formação da lentilha, filmagem em alta velocidade.*

## **1. INTRODUÇÃO**

O processo de soldagem por resistência a pontos é um dos processos de manufatura mais empregados pela indústria automobilística. Neste processo, duas ou mais chapas são soldadas pela fusão localizada das mesmas, através da aplicação de corrente elétrica e pressão. A utilização dos aços galvanizados, a fim de reduzir custos e aumentar a resistência à corrosão dos produtos, trouxe algumas complicações no que se refere à qualidade da soldagem, o que vem demandando novas linhas de pesquisa e o estudo mais aprofundado sobre o processo.

A literatura científica tem se focado na análise, monitoração e incremento dos mecanismos de formação da lentilha de solda sob diferentes condições, parâmetros e materiais com o objetivo de aperfeiçoar o processo de soldagem. Dickinson<sup>(1)</sup> e Kaiser<sup>(2)</sup>, dentre outros, tentaram compreender os efeitos dos parâmetros de soldagem, sobre a formação e crescimento da lentilha, com a intenção de melhorar e controlar estes parâmetros a fim de otimizar o processo. Recentemente, Cho e Rhee<sup>(3)</sup>

iniciaram um estudo utilizando câmeras de alta velocidade para monitorar o crescimento das lentilhas de solda e sua relação com os parâmetros de soldagem.

De acordo com essa linha de pesquisas, será apresentado neste artigo um estudo sobre o mecanismo de formação das lentilhas de solda utilizando uma câmera de alta velocidade e, diferentemente dos outros autores, mantendo-se o mesmo nível de energia para a realização das mesmas. Para tanto, serão utilizados dois equipamentos de soldagem distintos (corrente alternada: AC e média frequência com corrente contínua: MF) e três configurações de espessura de chapas (nomeadas de A, B e C).

A utilização de dois equipamentos distintos (AC e MF) se justifica pela tendência atual da indústria em substituir a soldagem AC pela MF, onde a nível comercial são destacadas as vantagens do processo com corrente contínua sobre a alternada. Além das vantagens diretas da adoção de uma máquina MF (menor transformador, menos perda no secundário, etc.), os fabricantes têm acenado que se obtém menor tempo de soldagem, melhor controle sobre os parâmetros e menor estresse termo-mecânico do eletrodo, sem contudo apresentar um estudo científico sobre este tema.

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A soldagem foi realizada utilizando-se dois equipamentos de soldagem por resistência a pontos. O equipamento de corrente alternada (AC) é composto de um transformador (Soltronic HT75 2 MF, 440V, 75 kVA, 170 A no circuito primário), um controlador (Fase Saldatura com potencia nominal de 54 kVA) e uma pinça de soldagem pneumática (pressões de 87 a 261 kgf) refrigerada a água. A corrente de soldagem (no circuito secundário) varia de 2 a 6 kA com 100 ciclos de solda máximos. O equipamento média frequência (MF) é composto de um transformador (PSG 3100), um controlador (PSI6100.100L) e uma pinça de soldagem pneumática refrigerada a água. A corrente de soldagem (no circuito secundário), para este equipamento, varia de 1 a 20 kA.

A visualização da poça de fusão (Figura 1) foi realizada através da utilização de uma câmera de alta velocidade (Nac, model Memrecam CI V-145-J) com a montagem de lentes (Nikon 90 mm, f#2.5 e 55 mm de diâmetro, acrescido de lentes UV) adequada para o ajuste do foco e “zoom”. A iluminação foi realizada por uma fonte de luz (modelo Arrilite 1000, com 1000w, 60 Hz, 45°-250°C).

Os eletrodos utilizados foram de diâmetro externo de 16 mm, tipo esféricos, classe A, grupo 2, dureza 75 HRb e 75% IACS. Os mesmos tiveram suas extremidades usinadas e foram instalados perpendicularmente às chapas (Figura 2a). Esta usinagem foi necessária para evitar que os eletrodos pressionassem indevidamente o ponto de solda (realizado pela metade) e também para permitir uma melhor visualização da lentilha em formação (Figura 2b).

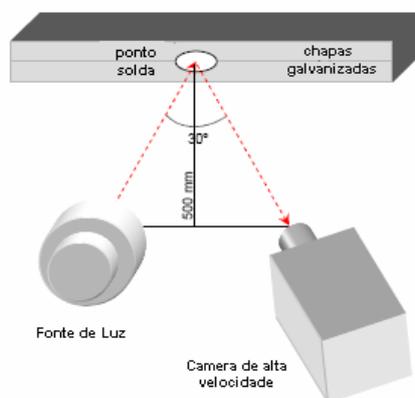


Figura 1. Montagem experimental.

Como a soldagem no experimento não corresponde à situação real, foi realizado um ajuste entre a situação real e a encontrada durante as filmagens. Este ajuste foi realizado sob dois critérios:

mesma energia de soldagem e mesma pressão. A utilização de uma mesma energia foi conseguida aplicando-se a Equação 1, que representa a geração de calor por efeito joule. Considerando que a área do eletrodo na soldagem durante a visualização é a metade da área na soldagem convencional, a pressão aplicada nos eletrodos ( $F_2$ ) também foi reduzida pela metade ( $F_2=F_1/2$ ).

$$E = I_{rms}^2 \cdot R \cdot Ts = I_{rms}^2 \cdot \frac{\rho \cdot \ell}{A} \cdot Ts \quad (1)$$

Onde: E é o calor gerado nas chapas pelo efeito Joule;  $I_{rms}$  é a corrente de soldagem rms real; R e a resistência das chapas;  $\rho$  é a resistividade elétrica das chapas;  $\ell$  é a espessura total das chapas; A é a área do ponto de solda e Ts o tempo total do ciclo de soldagem.

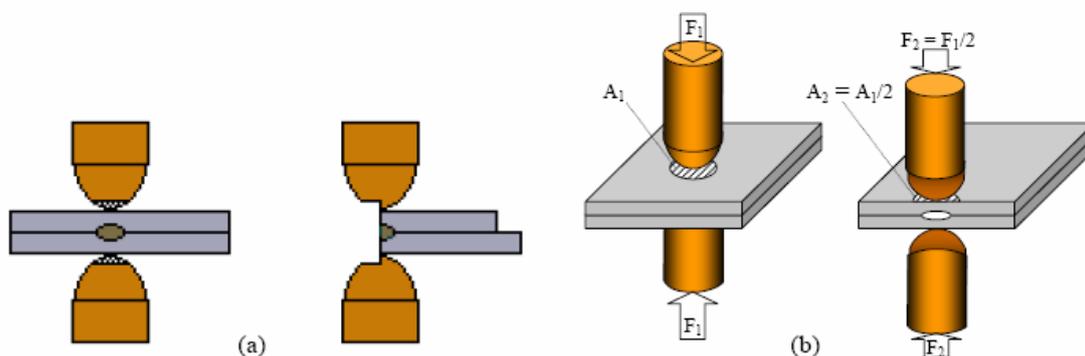


Figura 2. (a) chapas e eletrodos posicionados para a realização do experimento e (b) comparação entre os aspectos geométricos na situação de soldagem real e na encontrada para a visualização

As chapas utilizadas para a realização do experimento foram galvanizadas (por imersão a quente) de dimensões 100 x 25 mm. Três diferentes combinações foram empregadas, chamadas A, B e C. A configuração A faz uso de chapas de 2.0 e 2.0 mm de espessura; a configuração B faz uso de chapas 2.0 e 1.2 mm de espessura e a configuração C faz uso de chapas de 1.2 e 1.2 mm de espessura. As chapas foram instaladas uma sobre a outra, alinhadas e isoladas (através da colocação de folhas de papel entre as mesmas) a fim de se evitar efeitos de desvios de corrente (“shunt”). As superfícies foram limpas com detergente e secas com jato de ar.

A escolha dos parâmetros de soldagem se deu em dois estágios. Primeiramente, foram pesquisados os parâmetros de soldagem utilizados pela indústria, de onde foram encontrados os envelopes operacionais adotados para os testes. Estes envelopes consistem na identificação dos parâmetros de corrente, força e ciclos de solda mínimos para a união das chapas até valores máximos de corrente, força e ciclos de solda onde a expulsão de material fundido ainda não é observada. Após a identificação dos envelopes, cujos resultados foram previamente publicados<sup>(5)</sup>, as condições de soldagem obtidas (condições reais de soldagem) foram ajustadas para a soldagem dos testes com visualização aplicando-se o procedimento descrito pela Equação 1, vista acima.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Um total de seis envelopes de trabalho foram utilizados para as três configurações de chapas galvanizadas<sup>(5)</sup>. Destes seis envelopes operacionais, cinco condições de soldagem foram selecionadas para os experimentos (Tabela 1). Os experimentos 4735, 4736 e 4737 foram adquiridos através dos parâmetros de soldagem localizados no centróide dos envelopes de trabalho, a saber: 5kA; 174kgf e 30 ciclos de solda (500ms). Como esclarecido na seção 2, estes valores não podem ser prontamente utilizados e precisaram ser convertidos para 3,5 kA, 87kgf e 30 ciclos de solda (500ms). Os experimentos 4739 e 4740 foram realizados para se traçar uma comparação com o experimento 4735, a fim de se investigar o efeito da corrente rms na formação das lentilhas de solda. Vale ressaltar que o ciclo de solda, para o equipamento de corrente alternada (AC), é dado

em função da frequência da rede elétrica (60Hz) e vale 1/60s ou 16,7ms, enquanto que para o equipamento de média frequência (MF) os ciclos de solda são definidos diretamente em milissegundos.

Tabela 1. Condições de soldagem dos envelopes operacionais selecionados. A tensão rms ( $V_{rms}$ ) foi mensurada pelo sistema DAQ. Todos os experimentos para 30 ciclos de solda e 87 kgf de pressão

| Experimento | $I_{rms}$ [A] | $V_{rms}$ [V] | Configuração das chapas |
|-------------|---------------|---------------|-------------------------|
| 4735        | 3504          | 1,06          | A                       |
| 4736        | 3534          | 0,9           | B                       |
| 4737        | 3561          | 0,81          | C                       |
| 4739        | 2060          | 0,73          | A                       |
| 4740        | 3027          | 1,01          | A                       |

No experimento 4735 (Figura 4) a primeira imagem apresenta as chapas galvanizadas sob os eletrodos, sem a passagem de corrente. A segunda imagem apresenta o primeiro ciclo de soldagem, onde as primeiras gotas líquidas começam a surgir na superfície da chapa superior, para ambos os processos (AC e MF). Estas gotas indicam o início da queima da camada de zinco do revestimento. Na terceira imagem (10° ciclo de solda) observa-se uma grande quantidade de gotas de zinco fundido que começam a ser expelidas da região da solda. Para o processo MF já se observa a formação da lentilha de solda, o que ainda não pode ser observado pelo processo AC. Na quarta imagem (12° ciclo de solda) observa-se o aquecimento mais pronunciado das chapas pelo processo AC, enquanto que pelo processo MF a lentilha já está completamente formada. Pela quinta imagem (16° ciclo de solda) pode-se observar o início da formação da lentilha de solda pelo processo AC, bastante atrasada em relação ao processo MF. Na sexta imagem (21° ciclo de solda) observa-se que, pelo processo MF, a solda já poderia ter sido realizada, uma vez que a lentilha já atingiu seu tamanho máximo e que já houve o início da deformação exagerada das chapas na região da solda. Ainda em relação a esta imagem, pode-se observar que após a realização da metade dos ciclos de solda a lentilha, pelo processo AC, ainda está em formação. Na sétima imagem tem-se a conclusão da soldagem (30° ciclo de solda). Nesta imagem pode-se observar que o tempo de solda foi excessivo para o processo MF, causando uma grande deformação das chapas na região da soldagem. Este tempo de soldagem, entretanto, não foi exagerado para o processo AC, onde a lentilha atingiu seu tamanho máximo sem provocar a deformação exagerada das chapas.

No experimento 4736 (Figura 4) as imagens 1 e 2 são similares às comentadas para o experimento 4735. Na terceira imagem (10° ciclo de solda) pode-se observar a formação da lentilha de solda na chapa mais espessa para os dois processos (AC e MF), devido à maior resistência à passagem de corrente elétrica nesta chapa. Na quarta imagem (12° ciclo de solda) pode-se observar que, curiosamente, o crescimento da lentilha de solda pelo processo AC é maior que para o processo MF, sendo que para este, a chapa de menor espessura sequer foi fundida. Na quinta imagem (16° ciclo de solda) pode-se observar a continuação do crescimento das lentilhas de solda, para os dois processos, e também a expulsão das gotas de zinco do revestimento. Na sexta imagem (21° ciclo de solda) pode-se observar que as lentilhas já atingiram seu tamanho máximo e que, pelo processo AC, a expulsão do material fundido da região da solda é eminente. Na sétima imagem (30° ciclo de solda) tem-se o encerramento da solda, com o processo MF apresentando uma lentilha mais bem definida e controlada, sem expulsões de material fundido ou respingos.

No experimento 4737 (Figura 5) as imagens 1 e 2 são similares às comentadas para o experimento 4735. Na terceira imagem (10° ciclo) pode-se observar o início de formação da lentilha de solda para os dois processos (AC e MF) e ainda a explosão da lentilha com expulsão de material fundido para o processo AC. Na quarta imagem (12° ciclo) observa-se a instabilidade na lentilha pelo processo AC (respingos, expulsão de material, fumaça) enquanto o crescimento da lentilha se dá suavemente pelo processo MF. Na quinta imagem (16° ciclo) observa-se o desvio da lentilha para a superfície de uma das chapas pelo processo AC. Na sexta imagem (21° ciclo) a lentilha é claramente desviada da interface das duas chapas para a interface chapa-eletrodo para o processo

AC. Ainda por esta imagem observa-se que a lentilha atingiu seu tamanho máximo pelo processo MF. Na sétima imagem (30° ciclo) tem-se o final da solda onde se pode observar a qualidade inferior do ponto realizado pelo processo AC em relação ao realizado pelo processo MF.

No experimento 4739 (Figura 5) as imagens 1 e 2 são similares às comentadas para o experimento 4735. As imagens 3, 4, 5 e 6 mostram apenas a formação e a expulsão das gotas de zinco do revestimento das chapas, porém, sem a formação da lentilha de solda. Na sétima imagem (30° ciclo) chega-se ao final da solda sem que a mesma tenha se processado. A lentilha não foi formada observando-se, apenas, o escurecimento das chapas.

No experimento 4740 (Figura 6) as imagens 1 e 2 são similares às comentadas para o experimento 4735. Na terceira imagem (10° ciclo) observa-se a formação de gotas de zinco fundidas do revestimento (bem maiores para o processo AC) e também o início do aquecimento mais pronunciado das chapas para os dois processos. Na quarta imagem (12° ciclo) observa-se a formação da lentilha de solda, bem maior para o processo AC. Na quinta imagem (16° ciclo) observa-se o crescimento das lentilhas, de maior volume e com alguma expulsão de material para o processo AC e bem mais controlada para o processo MF (lentilha sendo formada na interface das chapas). Na sexta imagem (21° ciclo) observa-se um ponto de solda bem mais confinado na interface entre as duas chapas para o processo MF e um ponto de solda bem maior para o processo AC. Na sétima imagem (30° ciclo) chega-se ao final da solda com um ponto de solda de menores dimensões para o processo MF.

#### 4. CONCLUSÕES

Envelopes operacionais<sup>(5)</sup> práticos e tecnológicos foram empregados para três configurações de chapas galvanizadas soldadas por resistência a ponto em corrente contínua (MF) e corrente alternada (AC). Cinco condições experimentais foram selecionadas utilizando-se estes envelopes operacionais e filmadas através de uma câmera de alta velocidade. Através deste procedimento e pelos resultados apresentados acima têm-se as seguintes conclusões:

- A camada de zinco do revestimento começa a se queimar já no primeiro ciclo de solda;
- A soldagem por média frequência (MF) oferece a possibilidade de se obter pontos de solda mais uniformes e em tempo de soldagem menor (dependendo da configuração das chapas);
- O risco de explosão da lentilha de solda (e a ocorrência de defeitos na soldagem) pode ser reduzido utilizando-se a soldagem por média frequência;
- Visto que a corrente não oscila (frequência da rede elétrica) durante a soldagem para o processo por média frequência, pode-se concluir que este processo acarreta em economia de energia elétrica;
- As lentilhas de solda têm sua formação após o 10° ciclo de solda para correntes maiores que 3kA;
- Não foram observadas lentilhas de solda para correntes inferiores a 2kA.

#### 5. REFERENCIAS

1. DICKINSON, D. W.; FRANKLIN, J. E.; and STANYA, A. 1980. "Characterization of spot welding behavior by dynamic electrical resistance monitoring". *Welding Journal* 59(6): 170-s to 176-s.
2. KAYSER, J. G., DUNN, G. J., and EAGAR, T. W. 1982, "The effect of electrical resistance on nugget formation during spot welding. *Welding Journal* 61(6): 167-s to 174-s
3. CHO, Y., and RHEE, S. 2003, "Experimental Study of Nugget Formation in Resistance Spot Welding". *Welding Journal* (8): 195-s to 201-s.
4. CHO, H. S., and CHO, Y. J. 1989. "A study of the thermal behavior in resistance spot welding. *Welding Journal* 68(6): 236-s to 244-s.
5. VARGAS, J. E. ; WOLFF, M. A. ; ALFARO, S. C. A. ; VILARINHO, L. O. . High Speed Images of Resistance Spot Welding Synchronized with Electrical Signals. In: 18th International Congress of Mechanical Engineering, 2005, Ouro Preto - MG. Proceedings of COBEM 2005 18th International Congress of Mechanical Engineering, 2005.

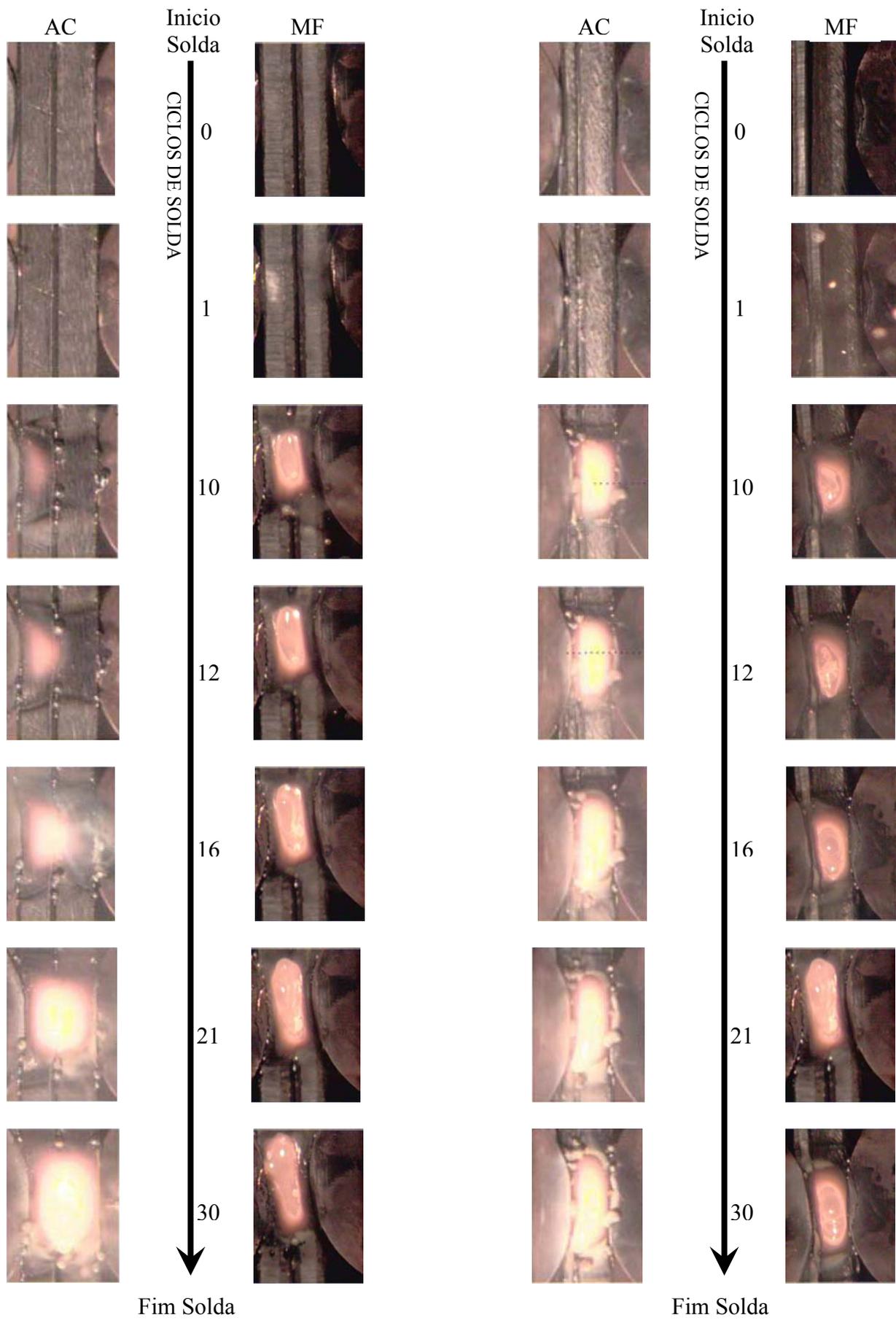


Figura 4. Filmagem em alta velocidade experimentos 4735 (esquerda) e 4736 (direita).

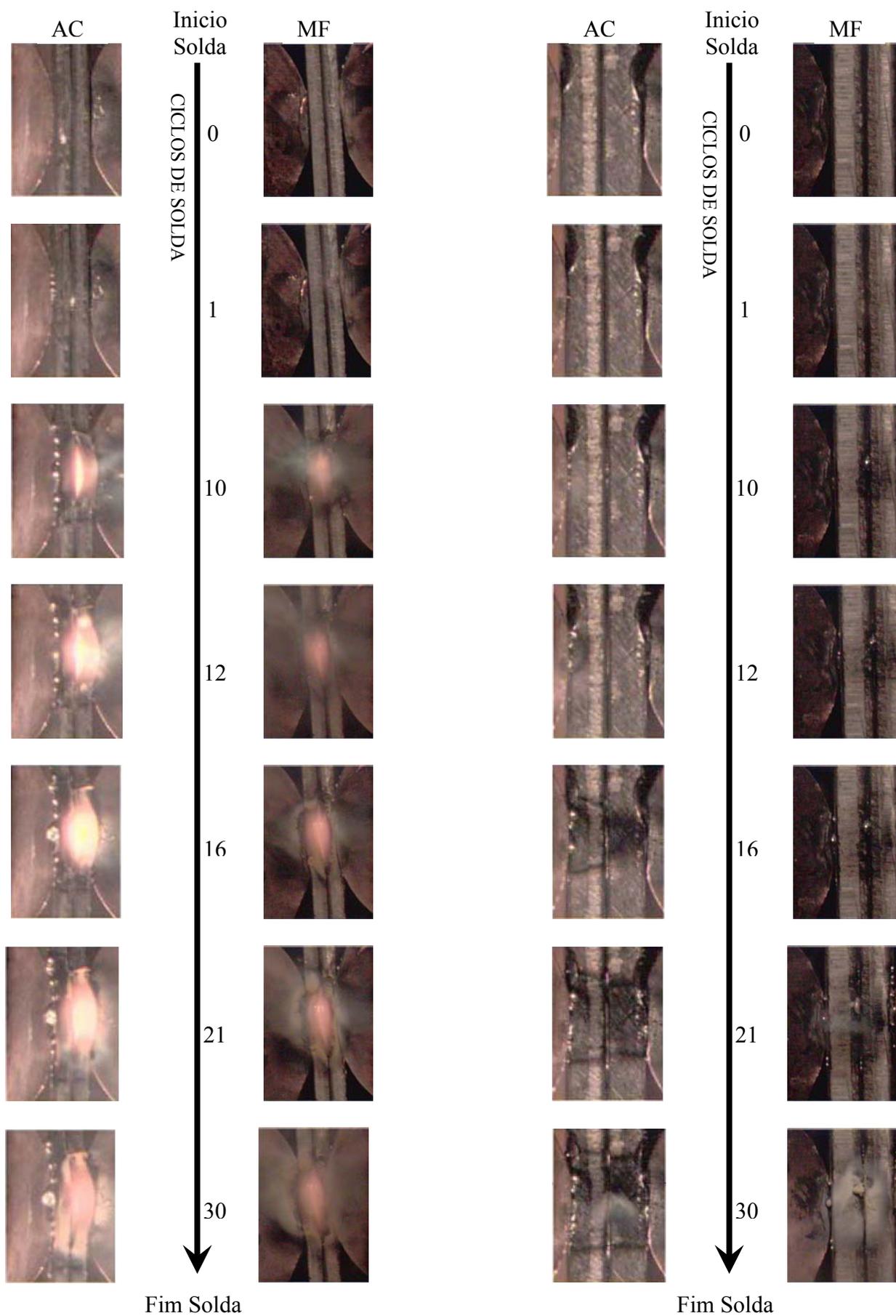


Figura 5. Filmagem em alta velocidade experimentos 4737 (esquerda) e 4739 (direita).

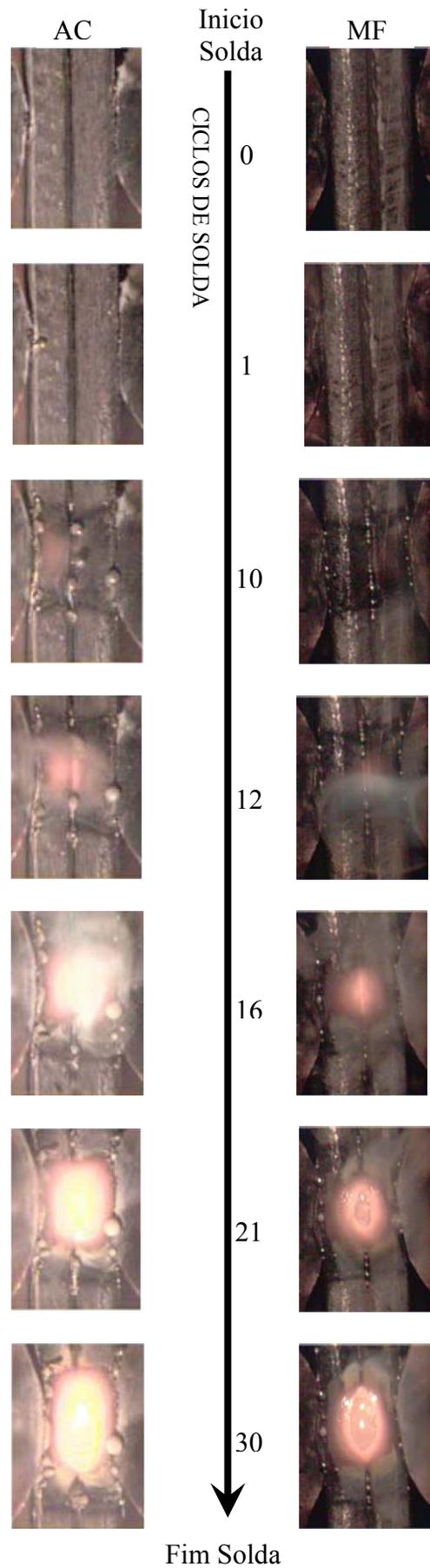


Figura 6. Filmagem em alta velocidade do experimento 4740.

# **A COMPARISON BETWEEN AC ALTERNATE CURRENT AND CONTINUOUS MEDIUM FREQUENCY CURRENT FOR RSW PROCESSES BY USING HIGH SPEED FILMING**

## **Marco Antonio Wolff**

Undergraduate student, Federal University of Uberlândia, Laprosolda, Campus Santa Mônica, Bloco 1M, 38400-032  
[mawolff@mecanica.ufu.br](mailto:mawolff@mecanica.ufu.br)

## **José Enrique Vargas**

MSc at University of Brasilia (Graco) and Federal University of Uberlândia (Laprosolda).  
[jevargas@hotmail.com](mailto:jevargas@hotmail.com)

## **Sadek C. Absi Alfaro**

Ph.D. Full Professor, University of Brasilia, Graco, Campus Darcy Ribeiro, 70910-900  
[sadek@unb.br](mailto:sadek@unb.br)

## **Louriel Oliveira Vilarinho**

Ph.D. Associate Professor, Federal University of Uberlândia, Laprosolda, Campus Santa Mônica, Bloco 1M, 38400-032  
[vilarinho@mecanica.ufu.br](mailto:vilarinho@mecanica.ufu.br)

***Abstract.** Resistance Spot Welding (RSW) is largely used in the automotive industry. It has high production rates (over 30 spots/minute) and good quality. However, the introduction of galvanized plates on production lines brought difficulties on the welding parameters setup. In addition, there is an industrial trend for replacing AC equipments (alternate current) by MF ones (continuous medium frequency current), under the claimed reason of performance improvement. Therefore, this work aims to observe by high speed filming the material melting and the weld pool (nugget) formation of both AC and MF weldments for different galvanized plates. The high speed images indicated that the MF-RSW has the advantage of nugget uniformity, whereas the AC welding presents nugget pulsation in 60 Hz.*

***Keywords:** Resistance Spot Welding, Nugget Formation, High-Speed Filming.*