



OBSERVAÇÃO DO EFEITO PINCH NA SOLDAGEM MIG/MAG DO ARAME AWS ER 309L.

Temistocles de Sousa Luz

tsluz@mecanica.ufu.br

Carlos Eduardo Aguiar Lima Rodrigues

ceduardo@mecanica.ufu.br

Valtair Antonio Ferraresi

Universidade Federal de Uberlândia, Laprosolda, Campus Santa Mônica, Bloco 1M, 38400-032

valtairf@mecanica.ufu.br

Resumo: Neste estudo é apresentado um registro experimental da ocorrência do fenômeno denominado “instabilidade pinch”, através de sua filmagem em alta velocidade. Para tanto, utilizou-se uma fonte de soldagem eletrônica, no modo tensão constante, o eletrodo AWS ER309L de 1,2 mm de diâmetro, e uma chapa de aço inoxidável tipo P410D. Para a proteção do arco e da poça de fusão utilizou-se o gás de proteção comercial apropriado, a uma vazão de 14 l/min. As filmagens em alta velocidade foram realizadas 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 então, a técnica da shadowgrafia. Os parâmetros que permitiram a visualização deste fenômeno foram: tensão de referência de 28 V; uma velocidade de alimentação do eletrodo de 9,5 m/min; corrente média de em torno de 265 A. Os resultados mostram que a instabilidade pinch, que é benéfica para a soldagem ao ocorrer à ponta do eletrodo, pode levar o mesmo ao colapso ao ocorrer na sua extensão, desestabilizando completamente o processo de soldagem, a depender dos parâmetros adotados.

Palavras-chave: MIG/MAG, Transferência metálica, Instabilidade Pinch, Shadowgrafia.

1. INTRODUÇÃO

Na soldagem ao arco elétrico, a força magnética pode ser gerada de duas maneiras: a primeira pela interação da corrente de soldagem com um campo aplicado externamente e segundo pela interação da corrente com seu próprio campo magnético. A indução externa de um campo externo tem pouca aplicação, como por exemplo, na deflexão do arco para permitir o direcionamento do arco e conseqüentemente da poça de fusão. O campo auto-induzido, por outro lado, tem efeitos que são evidentes em muitos aspectos da soldagem a arco. As interações entre este e o metal líquido, a ponta do eletrodo, o próprio arco e a poça de fusão são muito importantes para que um processo de soldagem tenha sucesso (Lancaster, 1986, Kim et al, 1993).

A força eletromagnética auto-induzida não é muito alta; por exemplo, para uma corrente de soldagem de 100 A, com densidade de corrente de $5 \times 10^7 \text{ A/m}^2$ pode gerar uma pressão máxima de $5 \times 10^{-3} \text{ atm}$. A força magnética é, no entanto, da mesma ordem das forças devido à gravidade e às geradas pela tensão superficial e, dessa forma, capaz de gerar fluxo.

Quando as linhas de fluxo de corrente são retas e paralelas e onde não há instabilidade, a força $\vec{J} \times \vec{B}$ é direcionada para o interior em um ângulo reto em relação ao fluxo de corrente podendo, dessa forma, ser contra-balanceado por um gradiente de pressão estática. Nas vizinhanças ou no interior do arco de soldagem, no entanto, as linhas de fluxo de corrente são muitas vezes, convergentes ou divergentes. O efeito dessa geometria é a causa do fluxo e em parte da rotação do fluido.

Considere um cilindro de fluido com um fluxo de corrente axial a si, podendo esse fluido estar submetido a uma pressão positiva devido à configuração do vaso que o contém ou devido a gravidade, ou submetido a forças geradas por tensão superficial. A força $\vec{J} \times \vec{B}$ age internamente. Caso a densidade de corrente seja aumentada suficientemente, isso pode superar a estabilidade do sistema pelo efeito das forças que agem no sistema. O cilindro tenderá a entrar em colapso internamente e a instabilidade poderá ocorrer. Esse fenômeno é conhecido como efeito “pinch” (Lancaster, 1986; Kim et al, 1993).

Para um cilindro o campo magnético é puramente azimutal e age quase sempre em um ângulo reto em relação à corrente. Dessa forma, a força magnética por unidade de volume em qualquer raio de dimensão r , a qual tende a entrar no sentido do condutor, é dada por:

$$\vec{J} \times \vec{B} = \frac{\mu_0 \cdot J^2 \cdot r}{2} \quad (1)$$

onde J é a densidade de corrente e μ_0 a permeabilidade magnética no vácuo.

Essa força age através do centro axial e pode ser balanceada por um gradiente de pressão radial no fluido, agindo em uma direção oposta. Assim tem-se:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\mu_0 \cdot J^2 \cdot r}{2} \quad (2)$$

Integrando teríamos:

$$p = -\frac{\mu_0 \cdot J^2 \cdot r^2}{4} + \text{constante} \quad (3)$$

N superfície onde $r = R$, a força $\vec{J} \times \vec{B}$ desaparece e a pressão torna-se igual à soma da pressão ambiente e a gerada pela tensão superficial γ , que no caso do cilindro, é igual a γ/R . Assim a pressão total é:

$$p = p_0 + \frac{\gamma}{R} + \frac{\mu_0 \cdot J^2}{4} (R^2 - r^2) \quad (4)$$

Para determinar a condição em que a força magnética pode gerar o efeito “pinch”, considere uma coluna cilíndrica de líquido rodeada por um gás, tal como um jato d’água no ar. Inicialmente procura-se um critério de instabilidade na ausência de corrente elétrica. O raio do cilindro é dado por R e a tensão superficial é γ . Suponha que a superfície do cilindro seja perturbada de modo que assuma a forma da Figura 2 é dado por:

$$r = R + \varepsilon \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot z\right) \quad (5)$$

onde ε é a amplitude de perturbação, λ o comprimento de onda e z a distância na direção longitudinal.

Ignorando a pressão ambiente, a qual é constante, a pressão no líquido pela tensão superficial é igual a:

$$p = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (6)$$

onde R_1 e R_2 são os raios principais da curvatura da superfície.

Para um cilindro, $R_1 = R$ e $R_2 = \infty$ de modo que a pressão é uniforme e é igual a γ/R . No cilindro com a perturbação superficial a pressão não é uniforme. No exemplo dado na Figura 1, onde a protuberância para fora da região cilíndrica inicial tem amplitude máxima, a pressão é dada por:

$$p_p = \gamma \left(\frac{1}{R + \varepsilon} + \frac{1}{R_\lambda} \right) \quad (7)$$

onde R_λ é o raio longitudinal para a curvatura de $r = R + \varepsilon$.

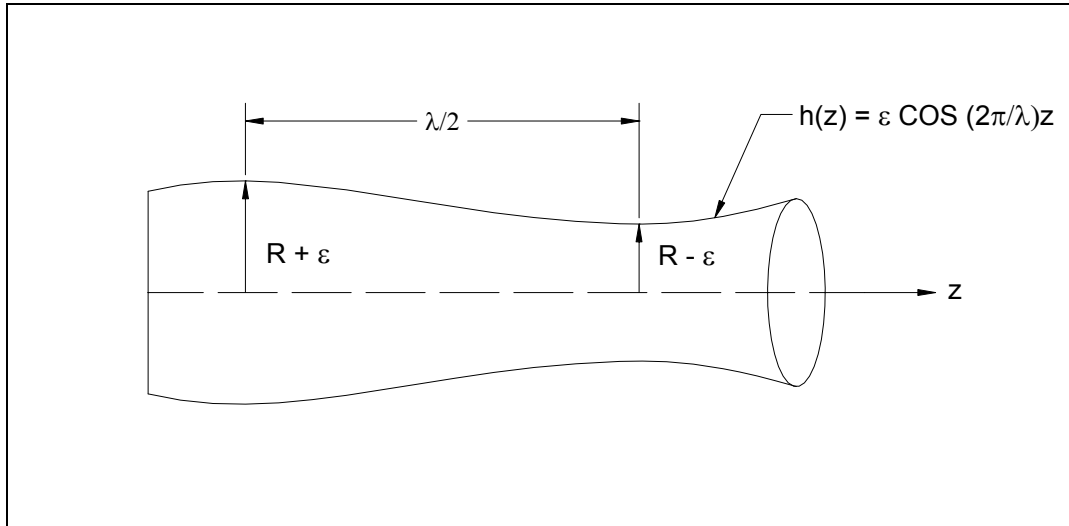


Figura 1 – Perturbação em uma coluna cilíndrica de líquido.

Nesse exemplo tem-se:

$$\frac{1}{R_\lambda} = \left(\frac{\partial^2 r}{\partial z^2} \right)_{z=\lambda} = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \cdot \varepsilon \quad (8)$$

Na região de protuberância a pressão é:

$$P_p = \gamma \cdot \left[\frac{1}{R + \varepsilon} + \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \cdot \varepsilon \right] \quad (9)$$

Similarmente, a região comprimida a pressão é dada por:

$$P_{pi} = \gamma \cdot \left[\frac{1}{R - \varepsilon} - \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \cdot \varepsilon \right] \quad (10)$$

Se a pressão na região com protuberância é maior que na região comprimida, o líquido poderá fluir desta região para a região comprimida e restabelecer a forma do cilindro, em outras palavras, o sistema será estável. Por outro lado, se a pressão for maior na região comprimida, o sistema se configura como instável, o cilindro entra em colapso, rompendo-se naquela região gerando uma gota da região estrangulada. As condições para a estabilidade podem ser expressas como:

$$\frac{d(P_p - P_{pi})}{d\varepsilon} > 0 \quad (\varepsilon \rightarrow 0) \quad (11)$$

ou das equações 9 e 10:

$$\gamma \cdot \left\{ \left[\frac{1}{R + \varepsilon} + \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \cdot \varepsilon \right] - \left[\frac{1}{R - \varepsilon} - \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \cdot \varepsilon \right] \right\} > 0 \quad (12)$$

que levam à seguinte conclusão para a estabilidade:

$$\lambda < 2\pi R \quad (13)$$

resultado primeiramente conseguido por Plateau considerando a energia. A situação de equilíbrio poderá ser expressa por:

$$\lambda_c = 2\pi R \quad (20)$$

onde, λ_c é o comprimento de onda crítico. Perturbações que têm um grande comprimento de onda podem fazer com que a coluna se rompa em gotas. Aqui se tem que λ_c é independente da tensão superficial γ .

Na presença de corrente elétrica tem-se:

$$P_p - P_{pi} = \gamma \cdot \left[\frac{1}{R - \varepsilon} - \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \cdot \varepsilon \right] + \frac{\mu_0 I^2}{4\pi(R - \varepsilon)^2} - \gamma \cdot \left[\frac{1}{R + \varepsilon} + \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \cdot \varepsilon \right] - \frac{\mu_0 I^2}{4\pi(R + \varepsilon)^2} \quad (21)$$

Aplicando a condição de instabilidade tem-se:

$$\frac{R^2 + \varepsilon^2}{(R^2 - \varepsilon^2)^2} + \frac{\mu_0 I^2 R (R^2 + 3\varepsilon^2)}{2\pi^2 \gamma (R^2 - \varepsilon^2)^3} > \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \quad (22)$$

Para um cilindro perfeito teremos:

$$\lambda_c = \frac{2\pi R}{\sqrt{1 + \frac{\mu_0 I^2}{2\pi^2 R \gamma}}} \quad (23)$$

Isso implica que na presença de corrente elétrica, o comprimento de onda crítico em que a coluna de líquido começa a se desestabilizar é reduzido.

A maioria dos estudos com base neste assunto aborda apenas o efeito da corrente sobre a transferência metálica, fenômeno que ocorre à ponta do eletrodo e através do arco voltaico ou de interação com a poça de fusão. No entanto, o objetivo deste trabalho é apresentar a ocorrência do efeito “pinch” na extensão de eletrodo percorrida por corrente, em uma condição em que o mesmo não vem a interferir na estabilidade do processo, e em outra condição em que o mesmo é responsável pelo corte eletromagnético do eletrodo.

2. MATERIAIS E METODOLOGIA

Utilizou-se para a soldagem uma fonte eletrônica multiprocessos, no modo tensão constante, na polaridade positiva (cc^+). Utilizou-se como material de adição os arames AWS ER309L de 1,2 mm de diâmetro com composição, segundo o fabricante, de 0,03%C; 0,30 a 0,65%Si, 1,00 a 2,50%Mn; 0,02%P; 0,015%S; 23,0 a 25,0%Cr 12,0 a 14,0%Ni. Para a proteção do arco e da poça de fusão utilizou-se o gás de proteção comercial STARGOLD SS a uma 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 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. Utilizaram-se duas condições de soldagem. Primeiramente utilizou-se uma tensão de referência de 28 V e uma velocidade de alimentação de 9,5 m/min a uma velocidade de soldagem de 52,3 cm/min. Isso forneceu uma corrente média de soldagem em torno de 265 A. Em seguida utilizou-se uma tensão de referência de 30V com velocidade de alimentação de 10,5 A e velocidade de soldagem de 57,8 cm/min, a qual forneceu uma corrente média de 281 A.

2.1. Técnica da Shadowgrafia

Para obter uma sequência de imagens com alta resolução no tempo, utiliza-se um canhão laser, um sistema óptico e uma câmera para filmagens em alta velocidade (técnica da shadowgrafia, Bálsamo *et al*, 2000). O sistema citado é mostrado na Figura 2. As filmagens são gravadas em uma sequência de imagens a uma frequência de 250 a 2000 quadros por segundo, monocromáticos, no formato TIFF (Tagged Image File Format). Utiliza-se uma objetiva com zoom para focar o eletrodo e a peça. Pretende-se utilizar a velocidade de filmagem de 2000 quadros por segundo, com obturação mecânica, e em cada quadro usar obturação eletrônica a 1/24000 (possibilitando reduzir distorções devidas ao movimento dos elementos filmados). Essas configurações permitem imagens com resolução de 252 x 188 pixels (h x v).

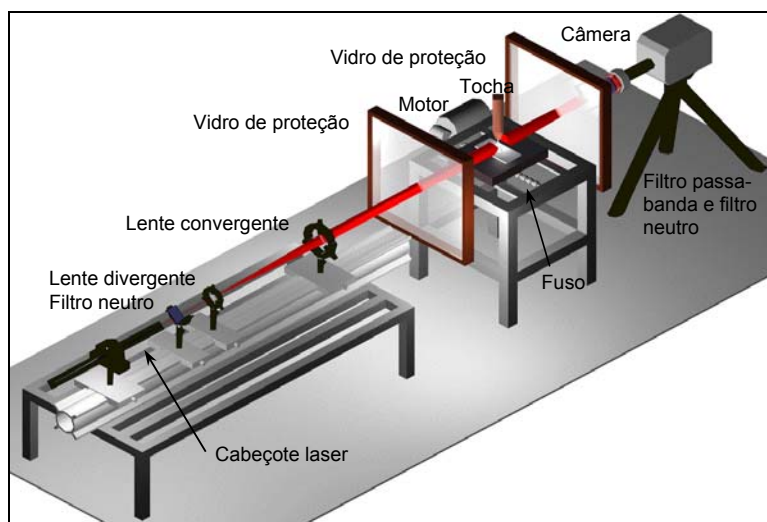


Figura 2 – Técnica de filmagem Shadowgrafia. (Vilarinho, 2000)

2.2. Utilização de um software específico para a análise da transferência metálica

Para a caracterização da transferência metálica utilizou-se um programa específico (Maia, 2001), feito na plataforma LabView®, denominado “Vídeo Analisador de Imagens de Transferência Metálica em Soldagem”. Este programa permite uma perfeita caracterização das transferências metálicas (sobretudo quanto aos parâmetros frequência de destacamento e diâmetro das gotas) e dos comprimentos do eletrodo e do arco de soldagem. As imagens analisadas utilizando o programa “Vídeo Analisador” são aquelas adquiridas através da técnica da “shadowgrafia”.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através da Figura 3 pode-se verificar a incidência do fenômeno de empescoçamento, o qual pode ter sido gerado pela passagem de corrente através do metal fundido aliado ao efeito Joule. Como em trabalhos anteriores (Lancaster, 1986) utilizando uma coluna líquida de mercúrio, pode-se verificar a incidência deste fenômeno, só que em um arame que está a se fundir. Analisando os quadros 2, 3 e 4 da Figura 3 poderão ser observados a incidência de mais de um empescoçamento, similarmente ao que ocorre com a coluna líquida de mercúrio apresentada por Lancaster (1986). Observa-se através dessa figura que o fenômeno ocorre por um leve intervalo de tempo, cerca de 45 ms (intervalo de 2,5 ms entre cada quadro da Figura 3). Muito embora se tenha observado a incidência de tal efeito, o colapso do sistema não ocorre.

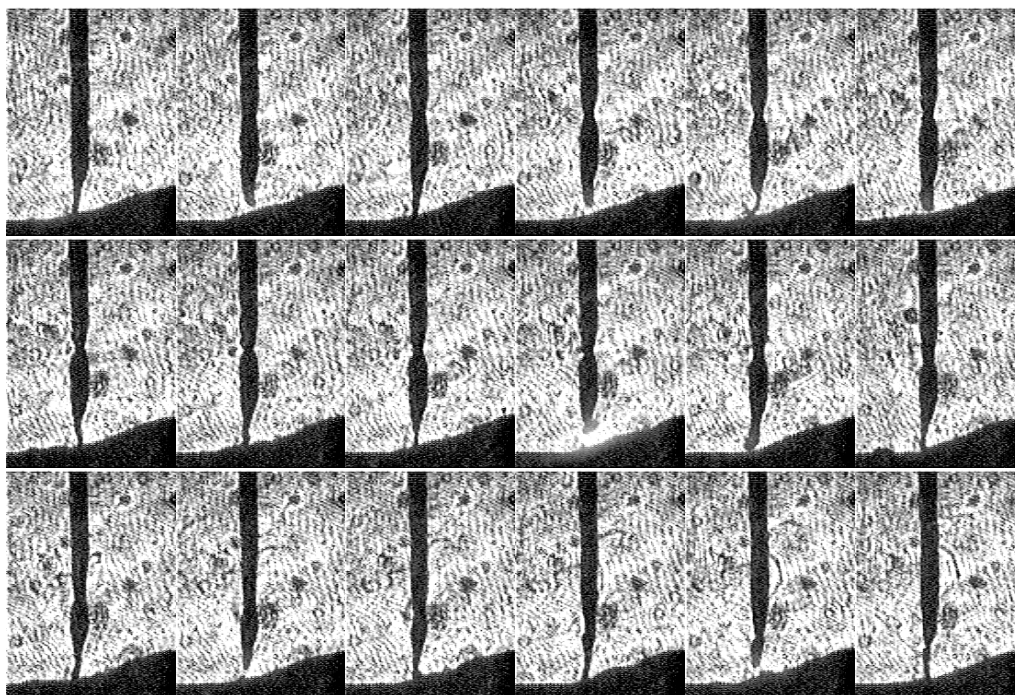


Figura 3 – Instabilidade “pinch” para o arame ER 309L (28V e 265A).

Na Figura 4, no entanto, observa-se que o sistema entrou em colapso. Acontece como que um “chicoteamento” resultante do conjunto de forças atuantes durante o processo. Observa-se que a diferenciação de parâmetros entre a primeira soldagem (Figura 3) e a segunda (Figura 4) é bem tênue mas suficiente para gerar um processo de instabilidade e desintegrar o eletrodo. Observa-se continuamente um afunilamento na extremidade do arame. Tal efeito pode ser também influenciado por esse fenômeno, além dos fenômenos gerados pelo escoamento dos fluidos na parte fundida no arame.

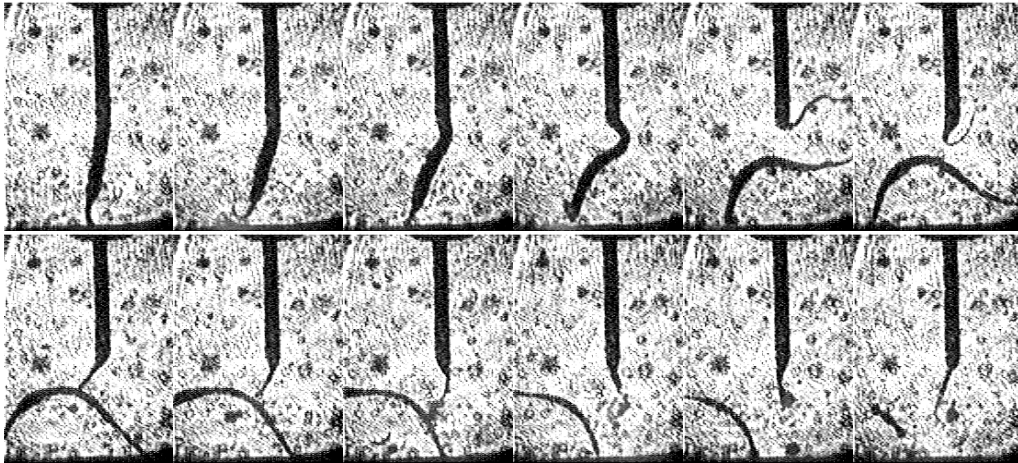


Figura 2 – Colapso na transferência metálica para a soldagem com o arame ER309L (30V e 281A).

4. CONCLUSÃO

Tendo em vista os objetivos do trabalho e a metodologia empregada, pode-se concluir que a instabilidade pinch pode ocorrer também na extensão do eletrodo, inclusive contribuindo para desestabilizar o processo de soldagem, dependendo dos parâmetros utilizados.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e UFU-FEMEC pela infraestrutura e suporte financeiro indispensável para a realização deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BÁLSAMO, P.S.S., VILARINHO, L. O., VILELA, M. & SCOTTI, A.; 2000, Development of an Experimental Technique for Studying Metal Transfer in Welding: Synchronized Shadowgraphy, *The Int. Journal for the Joining of Materials*, vol 12, no. 1, The European Institute for Joining of Materials (JOM), Denmark, pp1-12
- KIM, Y-S. and EAGAR, T.W. (1993), Metal Transfer in Pulsed Current Gas Metal Arc Welding, *Welding Research supplement*, AWS, july 1993, 279s-287s.
- KIM, Y-S. and EAGAR, T.W. (1993b), Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding, *Welding Research Supplement*, AWS, june 1993, 269s-278s.
- LANCASTER, J. F.: *The Physics of Welding*. 2nd edition, Pergamon Press, Oxford, 1986.
- MAIA, T.C.G., 2001, "Processamento de Imagens de Transferência Metálica em Soldagem a Arco Voltaico", Dissertação de Mestrado, Faculdade de Eng. Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia.
- VILARINHO, L. O., SCOTTI, A. 2000. An Alternative Algorithm For Synergic Pulsed Gmaw Of Aluminium. *Australasian Welding Journal*, v. 45, n. 2nd, pp. 36-44.

PINCH EFFECT OBSERVATION IN MIG/MAG WELDING OF AWS ER 309L WIRE

Temistocles de Sousa Luz

tsluz@mecanica.ufu.br

Carlos Eduardo Aguiar Lima Rodrigues

ceduardo@mecanica.ufu.br

Valtair Antonio Ferraresi

Federal University of Uberlândia, Laprosolda, Campus Santa Mônica, Bloco 1M, 38400-032

valtairf@mecanica.ufu.br

Abstract: *In this work, it was carried out an experimental register of the occurrence of the “pinch instability” phenomenon, through its high speed filming. For this, was used an electronic welding machine, in voltage constant mode, the AWS ER 309L wire with diameter 1,2 mm and a type P410D stainless steel plate. For the protection of the arc end the weld pool was used an appropriate commercial gas, with 14 l/min flux flow. The high speed filming was made at 2000 frames per second, using a collimate bean and a optical scheme with lens and neutral density filters, applying the shadowgraph technique. The parameters that allow the visualization of this phenomenon was: reference voltage 28 V; wire feed rate 9,5 m/min; amperage about 265 A. The result shows that pinch instability, that is good for welding if occurs at the electrode tip, if when occurring in its extension, the collapse can completely take it, causing instability on the welding process, depending on the adopted parameters.*

Keywords: *Welding, MIG/MAG, Metal transfer, Pinch instability, Shadowgraph.*