



COMPORTAMENTO DO CORDÃO NA SOLDAGEM GMAW PULSADA EM CHANFROS ESTREITOS

Warley Augusto Pereira

Fundação de Ensino Superior de São João Del Rei, Departamento de Mecânica

warleyap@funrei.br

Valtair Antonio Ferraresi

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica

valtairf@mecanica.ufu.br - Uberlândia, MG, Brasil

Resumo. Neste trabalho foram estudados os mecanismos que provocam a formação de irregularidades no cordão em soldagem GMAW pulsada automatizada em chanfros estreitos. Este estudo partiu de uma investigação preliminar, onde foi verificada uma relação entre alguns fatores ligados ao processo GMAW pulsado e a irregularidade do cordão. A partir desta investigação, realizou-se uma série de testes para identificar os mecanismos envolvidos na formação irregular dos cordões de solda. Para isto, utilizou-se uma câmara de filmagem de alta velocidade de captação de imagens (2000 quadros/s). Os resultados mostraram que para haver a formação regular do cordão, deverá ser depositado um certo volume mínimo de metal, necessário para o preenchimento do fundo do chanfro. Além disso, os resultados também mostraram que, devido à maior proximidade da ponta do eletrodo às paredes do chanfro do que com o fundo, ocorreu um desvio do arco, promovendo um desvio das gotas para as paredes do mesmo, causando uma instabilização na transferência metálica. O desvio do arco para as paredes do chanfro e o baixo volume de deposição causa uma má distribuição de calor na junta, gerando cordões irregulares.

Palavras-chave: GMAW pulsado, Automatização, Irregularidade do cordão, Chanfro estreito, Transferência metálica.

1. INTRODUÇÃO

A automação do processo GMAW (“Gas Metal Arc Welding”) com corrente pulsada, apesar do ótimo balanço entre produtividade e qualidade alcançado, continua sendo um objetivo a ser perseguido. Entretanto, a automação desse processo tem encontrado algumas dificuldades que desencorajam o seu uso em determinada situação particular, como em juntas fora da posição plana e de difícil acesso. Além disso, a viabilização da automação, do ponto de vista econômico, requer juntas menos volumosas (chanfro estreito), tornando-se um fator adicional de dificuldades.

Nos processos de soldagem mecanizados em chanfros estreitos, um problema encontrado é a dificuldade de manter o perfil correto do cordão de solda, acarretando em falta de fusão e de penetração (Pereira, 1995), além da existência de irregularidades no formato do cordão (Scotti, 1991 e Dutra & Scotti, 1993). Algumas das razões para tais defeitos geométricos são simples; por exemplo, a incompatibilidade entre a largura da folga, a velocidade de alimentação e a taxa de fusão, podem fornecer um volume de solda insuficiente para formar uma ligação metálica entre as paredes do chanfro. Porém, nem sempre se consegue identificar ou justificar a causa do surgimento de defeitos geométricos (Scotti, 1991).

Na prática, há muitos tipos diferentes de irregularidade de cordão. Algumas vezes é difícil distinguir um tipo do outro, devido às similaridades em aspecto. Algumas delas são bem conhecidas e freqüentemente ocorrem. Os tipos mais comuns no processo GMAW são a *mordedura* e o *"humping"*. Um tipo incomum de irregularidade do cordão é caracterizado pela não ligação metálica (ponte) entre as paredes da junta. Esta deficiência na ligação metálica em soldagem GMAW, provoca uma deterioração da forma do cordão, devido ao deslocamento do cordão para uma das paredes do chanfro, provocando falta de fusão no lado não preenchido (Figura 1A), ou para ambas as paredes do chanfro, levando à falta de fusão no fundo do chanfro (Figura 1B). Este tipo de irregularidade do cordão dificulta a soldagem contínua de trechos longos em soldagem GMAW automatizada.

Qualquer das irregularidades de cordão citadas podem ser corrigidas, através da seleção correta dos parâmetros que têm alguma influência sobre estas (Scotti, 1991). A importância de estudar este assunto mais completamente, porém, está relacionada à necessidade de se reduzir defeitos nas soldas devido à possibilidade de má formação dos cordões. O correto entendimento do mecanismo que governa a regularidade do cordão e a definição dos limites das faixas operacionais, promoverão a otimização do processo, minimizando os defeitos.

Pereira & Ferraresi (1999) mostraram a influência de parâmetros relacionados ao processo ou ao material de base utilizado sobre a irregularidade do cordão estudada. Neste trabalho foram analisados: velocidade de soldagem, posição do cabo terra, vazão do gás, tamanho da gota, tensão média do arco, ângulo da tocha, distância bico de contato peça (DBCP), corrente média do arco, tipo do gás de proteção, oxidação e pré-aquecimento dos corpos de prova e a geometria do chanfro (ângulo de abertura e folga da raiz). Os resultados deste trabalho indicaram que durante a soldagem, devido a flutuação dos níveis de corrente (pico e base) e à própria geometria do chanfro, a ponta do eletrodo poderia estar mais próxima das paredes do que do fundo do chanfro, provocando o deslocamento do arco para uma das paredes da junta, causando um desequilíbrio na transferência metálica e, conseqüentemente, uma alteração na distribuição de calor na junta. Eles verificaram ainda que existe um volume mínimo de material a ser depositado para que o cordão se regularize no fundo da junta.

Com base no exposto acima, este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento da formação irregular do cordão de solda e tentar identificar as causas deste fenômeno. Para esta análise, filmou-se as soldagens, onde foi possível visualizar o arco (apenas na fase de pulso) e a transferência das gotas durante os testes e verificar o comportamento destas variáveis sobre a formação irregular do cordão.



Figura 1 - Aspecto da irregularidade do cordão, (A) = simples e (B) = dupla.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Nos testes, utilizou-se corpos de prova de chapas de aço carbono comum (Figura 1) e arame de aço da classe ER70S6 de 1,0 mm de diâmetro. Usou-se uma DBCP de 15 mm e uma mistura contendo 90% Ar + 10% CO₂ como gás de proteção, com uma vazão de 12 l/min.

Foram realizadas soldagens dentro do chanfro, com o eletrodo alinhado no centro deste. Foi feito apenas um cordão em cada corpo de prova (passe de raiz). Os resultados foram analisados em função do aspecto do cordão e, quantitativamente, em função do volume de material depositado no chanfro dado pela relação entre as velocidades de soldagem e de alimentação do arame (V_s/V_a), isto é, se o parâmetro analisado não tiver influência sobre a irregularidade do cordão, esta relação permanece constante, caso contrário ela irá variar.

As soldagens foram filmadas para a análise do comportamento do arco e da transferência metálica. Para esta filmagem, foi utilizada uma câmara capaz de captar até 2000 quadros/s. Além disso foi usado um sistema de Shadowgrafia, que consta basicamente de uma luz de laser que atravessa o arco e um filtro passa banda que deixa passar apenas a luz do laser, filtrando a luz do arco, conforme descrito no trabalho de Bálamo & Vilarinho (1999).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pereira & Ferraresi (1999) verificaram a influência do volume de metal depositado e da geometria do chanfro sobre a formação irregular do cordão. Para comprovar a influência destas variáveis, realizou-se três etapas de testes. Na primeira, variou-se o volume de metal depositado por comprimento soldado. Na segunda, soldou-se dentro e fora do chanfro para verificar a influência das paredes sobre a irregularidade do cordão e na terceira analisou-se a influência do tipo de transferência metálica (pulsada e “spray” convencional).

3.1 Comportamento da transferência metálica

Nesta etapa, variou-se o volume de material depositado e analisou-se o comportamento da transferência metálica durante a soldagem. Para a variação do volume de metal depositado, fixou-se a velocidade de alimentação do arame (V_a) (na condição de uma gota por pulso) e variou-se a velocidade de soldagem (V_s). Os resultados destes testes estão na Tabela 1.

No Teste 1, onde V_s foi mais baixa, a análise das imagens mostrou que tanto o arco quanto a gota foram para o fundo do chanfro, mantendo o cordão regular (Figura 2 (a)). Neste caso, como o volume depositado foi suficiente para preencher o fundo do chanfro, o arco ficou sobre a poça fundida, reduzindo seu comprimento e deixando a ponta do arame mais próxima do fundo do que das paredes do chanfro, fazendo com que o arco fosse aberto no fundo da junta e as gotas fossem transferidas diretamente para este ponto.

Tabela 1 - Verificação da influência da variação de volume depositado.

| Teste | I_p (A) | I_b (A) | t_p (ms) | t_b (ms) | I_m (A) | U_m (V) | V_s (cm/min) | V_a (m/min) | Cordão |
|-------|--------------|--------------|---------------|---------------|--------------|--------------|-------------------|------------------|-----------|
| 1 | 282 | 102 | 5,2 | 9,7 | 167 | 25,1 | 20 | 6,5 | regular |
| 2 | 282 | 102 | 5,2 | 9,7 | 167 | 26,7 | 30 | 6,5 | irregular |
| 3 | 282 | 102 | 5,2 | 9,7 | 167 | 26,0 | 25 | 6,5 | irregular |

Onde: I_m = corrente média (A), U_m = tensão média (V), I_p = corrente de pico, I_b = corrente de base, t_p = tempo de pico e t_b = tempo de base.

Já nos testes 2 e 3, com a elevação de V_s , o volume depositado por unidade de comprimento foi menor, o arco ficou maior e o cordão irregular. Com isso, a ponta do arame ficou mais próxima das paredes do que do fundo do chanfro e o arco ficou aberto entre o eletrodo e uma das paredes, provavelmente a que estava mais próxima do eletrodo, devido a um provável desalinhamento do arame dentro do chanfro.

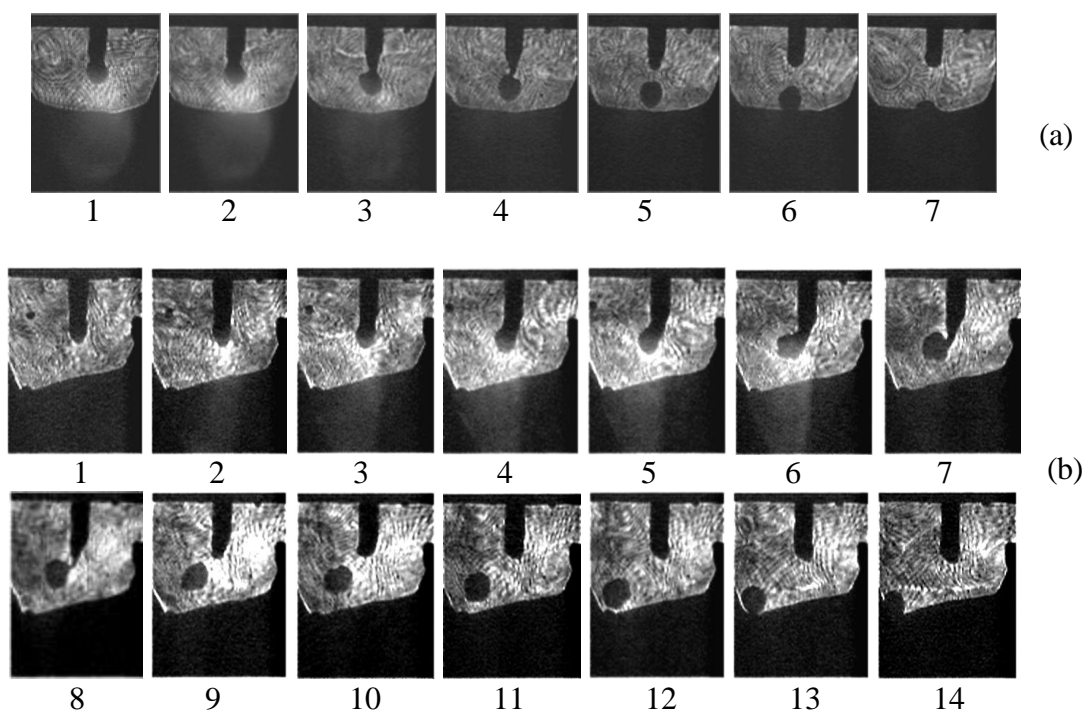


Figura 2 - Aspecto da transferência metálica, onde: (a) cordão regular e (b) cordão irregular.

Analisando detalhadamente as filmagens (Figura 2 (b)), verificou-se a seguinte seqüência de acontecimentos durante a formação de cordões irregulares:

- Durante a fase de base, após o destacamento das gotas, o arco cresce e fica aberto entre a ponta do arame e uma das paredes do chanfro (quadro 1 da Figura 2 (b) e Figura 3-a), provavelmente devido a distância ponta do eletrodo/parede ser menor que a distância ponta do eletrodo/fundo do chanfro, conforme citado anteriormente;
- Como a taxa de fusão nesta fase é baixa e a velocidade de alimentação do arame é constante, o arco diminui e a ponta do arame se dirige para o fundo do chanfro. Neste ponto, o arco atinge tanto a parede (na base próximo ao cobrejunta) quanto o fundo do chanfro (quadro 2 da Figura 2 (b) e Figura 3-b);

- c. Na fase de pulso, onde a taxa de fusão é maior, a gota começa a ser formada e o eletrodo se funde mais do lado onde o arco estava aberto, deixando a gota mais fluida deste lado e formando uma conicidade na ponta do eletrodo. Devido à maior intensidade de corrente, o jato de plasma torna-se mais forte e mais largo, atingindo tanto a parede (apenas uma delas) quanto o fundo do chanfro (quadro 3 da Figura 2 (b) e Figura 3-c);

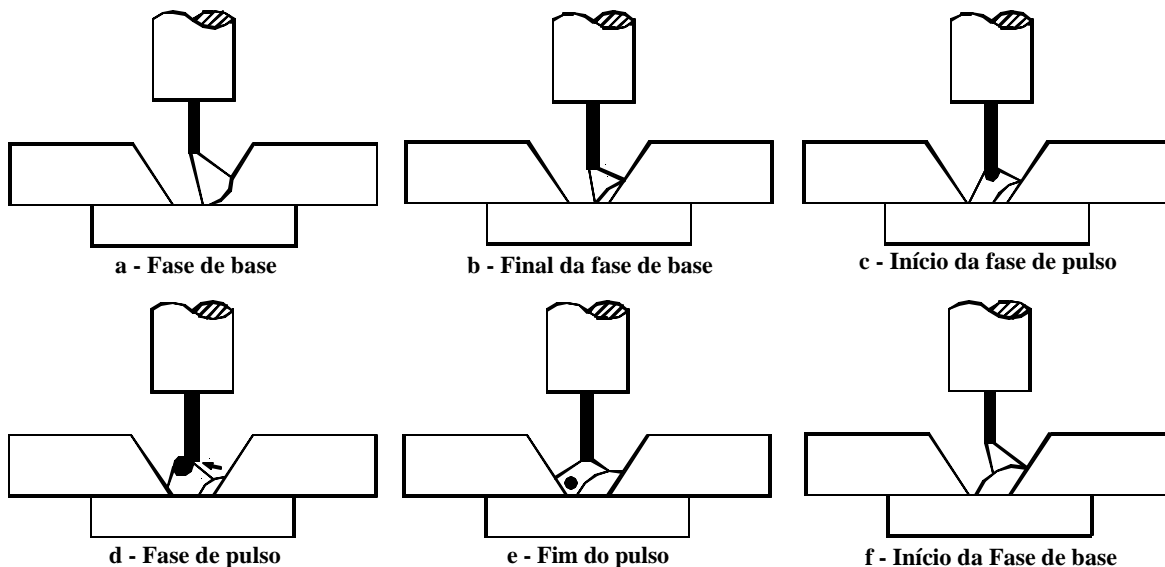


Figura 3 – Sequência mostrando o mecanismo de formação da irregularidade do cordão.

- d. A seguir, devido à pressão do arco contra a parede do chanfro, há uma repulsão da gota e esta é empurrada para a direção contrária à da parede onde o arco estava aberto (refluxo do plasma). Neste ponto, o arco cresce e se expande, atingindo ambas as paredes e o fundo do chanfro (quadros 4 a 8 da Figura 2 (b) e Figura 3-d).
- e. Iniciado o deslocamento lateral da gota na ponta do eletrodo, esta se transfere ou para a parede oposta de onde o arco estava aberto na fase de base ou para o fundo do chanfro (quadros de 9 a 13 da Figura 2 (b) e Figura 3-e), dependendo das seguintes condições:
- Em velocidades de soldagem maiores, onde o eletrodo se posiciona à frente da poça fundida e onde o volume depositado por unidade de comprimento é menor (para a mesma velocidade de alimentação do arame), o arco fica mais alto, atingindo as paredes do chanfro mais acima, fundindo-as e formando pequenos cordões nestas (um de cada lado). Quando as gotas são projetadas para uma das paredes da junta, estas são sugadas, por tensão superficial, por um dos cordões formados pela fusão do metal de base, formando um cordão maior entre a parede e o fundo do chanfro. Neste caso são formados dois cordões, um gerado pela soma da parede fundida mais as gotas destacadas e um segundo pela fusão do metal de base da parede oposta (Figura 4);
 - Quando se reduz a velocidade de soldagem, o comprimento do arco também diminui, ficando aberto numa posição mais abaixo nas paredes do chanfro, geralmente entre uma das paredes e o fundo do chanfro. Neste caso, as gotas, mesmo sendo transferidas para um dos lados, são sugadas, por tensão superficial, pelo cordão gerado pela fusão da parede onde o arco foi aberto, gerando o cordão apenas de um lado (Figura 3);
 - Reduzindo-se ainda mais a velocidade de soldagem, mesmo que as gotas sejam desviadas, o arco torna-se curto e o volume depositado fica alto, suficiente para que o chanfro seja preenchido e a irregularidade do cordão desapareça (Figura 2 (a)).
- f. Após o destacamento da gota (geralmente no final do pulso ou início da base), o arco volta a crescer e se desloca novamente para a parede onde originalmente ele estava aberto e o processo volta a se repetir (quadro 14 da Figura 2 (b) e Figura 3-f).

Nestes testes, observou-se que o desvio do arco e das gotas para as paredes da junta, prejudicaram a distribuição de calor dentro desta (a junta fica mais aquecida de um lado e mais “fria” do outro), prejudicando o preenchimento do chanfro pelo cordão e causando a irregularidade do cordão.

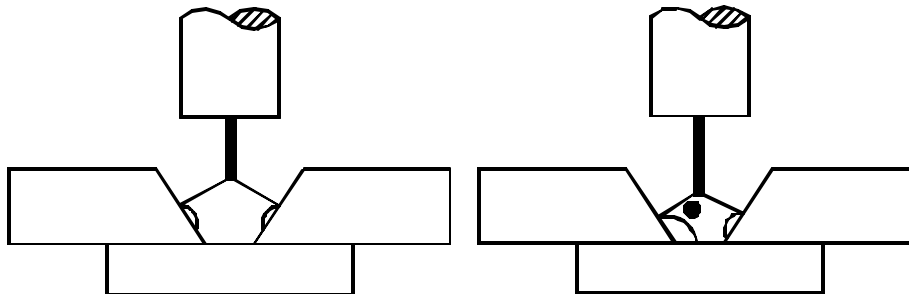


Figura 4 – Formação de irregularidade dupla do cordão.

3.2 Soldagem com simples deposição sobre chapa

Nesta etapa, analisou-se o comportamento da transferência metálica fora do chanfro (chapa plana). Para isto foram usadas duas condições, a primeira usando uma condição onde o cordão ficou irregular quando se soldou dentro do chanfro (teste 1 da Tabela 2) e a segunda usando uma condição onde o cordão ficou regular quando se soldou dentro do chanfro (teste 2 da Tabela 2). O terceiro teste desta tabela foi realizado com a condição onde se tinha uma gota por pulso dentro do chanfro (testes da Tabela 1), para verificar se a condição de uma gota por pulso é igual dentro e fora do chanfro.

Tabela 2 - Soldagem com simples deposição sobre chapa.

| Teste | Ip (A) | tp (ms) | Ib (A) | tb (ms) | Im (A) | Um (V) | Va (m/min) | Vs (cm/min) |
|-------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|-----------|---------------|----------------|
| 1 | 282 | 4,9 | 103 | 9,1 | 164 | 28,9 | 6,6 | 25 |
| 2 | 282 | 4,9 | 103 | 9,1 | 165 | 28,0 | 6,6 | 20 |
| 3 | 282 | 5,1 | 103 | 9,7 | 164 | 28,6 | 6,5 | 25 |

Através da filmagem, verificou-se que, em qualquer das condições testadas, tanto o arco quanto o cordão ficaram sempre regulares, mesmo não tendo sido obtida a condição de uma gota por pulso. Além disso, em nenhum dos testes as gotas foram desviadas da direção do eixo do eletrodo. Desta forma, fica evidenciado que a presença das paredes do chanfro é decisiva para o surgimento da irregularidade do cordão, devido ao desvio do arco e, conseqüentemente, da gota para uma ou ambas as paredes da junta. Entretanto, se a velocidade de soldagem for muito alta, mesmo em chapa plana poderá ocorrer convexidade excessiva do cordão, o chamado defeito “humping” ou mesmo mordedura.

O segundo comportamento observado quando se comparou soldagem dentro e fora do chanfro, foi que, nas mesmas condições usadas dentro do chanfro, onde se conseguiu uma gota por pulso, quando se soldou em chapa plana, não foi possível obter a condição de uma gota por pulso (0,73 gotas/pulso). Isto indica que a presença das paredes do chanfro tem uma certa influência sobre a transferência metálica e, conseqüentemente, sobre a irregularidade do cordão. Provavelmente esta modificação da transferência metálica quando se sai do chanfro para uma chapa plana se deve à mudança do perfil do arco (comprimento e abertura).

3.3 Influência do tipo de transferência metálica

Como nos testes anteriores foi verificado que a irregularidade do cordão não se deve ao fato de não se ter uma gota por pulso, aparentemente esta irregularidade do cordão também poderá ocorrer em qualquer tipo de transferência por gotas, desde que ocorra qualquer um dos fenômenos causadores da irregularidade do cordão, como o baixo volume de metal depositado e a distribuição irregular de calor na junta. Para comprovar isto, foram realizados testes no processo GMAW convencional (tensão constante) com transferência “spray” (Tabela 3).

Tabela 3 – Soldagem com transferência “spray”.

| Teste | Vs (cm/min) | Va (m/min) | Vs/Va | Uref (V) | Im (A) | Um (V) | Cordão |
|-------|----------------|---------------|--------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 78,0 | 10,8 | 0,0719 | 33 | 250 | 31,0 | irregular |
| 2 | 67,8 | 10,8 | 0,0625 | 33 | 252 | 31,0 | irregular |
| 3 | 58,2 | 10,8 | 0,0537 | 33 | 248 | 31,0 | irregular |
| 4 | 53,5 | 10,8 | 0,0493 | 33 | 247 | 31,0 | irregular |
| 5 | 48,7 | 10,8 | 0,0449 | 33 | 251 | 30,9 | regular |

Onde U_{ref} = tensão de referência (V) ajustada na fonte e Vs/Va = relação volumétrica.

Nestes testes, foi possível verificar que quando se soldou com velocidades mais altas, houve um pequeno desvio do arco para uma das paredes do chanfro, embora as gotas tenham sido transferidas diretamente para o fundo. Apesar do cordão ter se formado no fundo do chanfro, este apresentou convexidade excessiva e não conseguiu molhar as paredes (Figura 5).

Aparentemente esta alta convexidade do cordão ocorreu porque, quando se solda em altas velocidades, a solidificação do cordão ocorre antes que haja tempo deste escorrer para os lados (alta taxa de resfriamento). No caso de soldagem em junta chanfrada esta velocidade de solidificação do cordão é ainda maior, visto que, devido à dificuldade do arco atingir o fundo do chanfro, o aquecimento no fundo é menor que nas paredes, desta forma, o cobrejunta retira calor mais rapidamente do cordão, acelerando sua solidificação e reduzindo a capacidade de molhamento do cordão nas paredes do chanfro.

Com a diminuição da Vs o cordão tendeu a ser formar corretamente, estabilizando-se no fundo do chanfro e eliminando a convexidade excessiva.

O fato da irregularidade do cordão também ocorrer na transferência do tipo “spray”, mostra que não é o modo de transferência metálica que atua na formação da irregularidade do cordão e sim a geometria da junta que favorece a abertura do arco nas paredes do chanfro (quando o arco é longo), tornando a transferência metálica irregular e, conseqüentemente, gerando cordões irregulares. Além da geometria da junta, se o volume de metal depositado não for suficiente para preenchê-la, a irregularidade do cordão também ocorrerá.

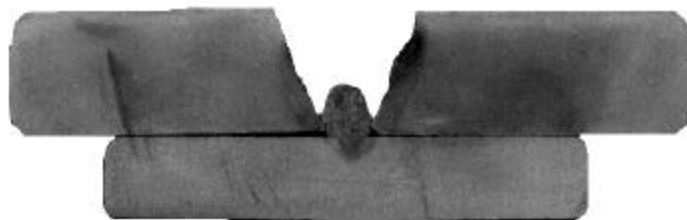


Figura 5 – Convexidade excessiva do cordão.

4. CONCLUSÕES

1. A má distribuição de calor na junta, que é o principal mecanismo envolvido na formação irregular do cordão, é devido ao desvio do arco, pela maior proximidade da ponta do eletrodo às paredes do chanfro, em arcos longos ou em soldas com baixos volumes depositados e ao desvio das gotas, causada pelo refluxo do plasma.
2. A condição de uma gota por pulso foi alterada quando se saiu de um chanfro em V para uma chapa plana. Além disso, a condição de uma gota por pulso não evitou que houvesse formação irregular do cordão em soldagem dentro de chanfro;
3. Mesmo quando há desvio das gotas, o cordão pode ser regularmente preenchido, desde que haja um volume de material (a uma alta temperatura) necessário para o preenchimento do chanfro;
4. Testes com transferência "spray" convencional mostraram que independentemente do tipo de transferência, sempre há a possibilidade de ocorrer a desestabilização do cordão, desde que as condições para que isto aconteça sejam satisfeitas;

REFERÊNCIAS

- Bálsamo, P. S. S., Vilarinho, L. O. e Scotti, A. (1999). “Determinação Criteriosa dos Parâmetros de Pulso Para Soldagem MIG Pulsada em Alumínio e Aço Inoxidável”, Anais do XXV ENTS, Belo Horizonte, 8 a 10 de setembro de 1999.
- Dutra, J. C. e Scotti, A. (1993). “Uma Contribuição ao Estudo da Soldagem Vertical Ascendente Empregando o Processo MIG/MAG Pulsado”, Anais do COBEM/93, Brasília, dezembro de 1993.
- Pereira, W. A. (1995). “Comparação de Características Operacionais Entre os Processos MIG Pulsado e MAG Curto-Circuito”, Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, Abril de 1995. 142 p.
- Pereira, W. A. & Ferraresi, V. A. (1999). “Estudo da Instabilidade do Cordão em Soldagem MIG Pulsada”. XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica – COBEM, Águas de Lindóia – SP, 22 a 26 de nov. 1999.
- Quites, A. M. e Dutra, J. C. (1979). “Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico”, Editora EDEME, Florianópolis, 1979, 248 p.
- Scotti, A. (1991). “Process Modelling to Establish Control Algorithms for Automated GMAW”, PhD Thesis, Cranfield Institute of Technology, UK, setembro de 1991, 273 p.

Abstract. In this work, the mechanisms that cause the bead irregularities formation in automated pulsed GMA welding in narrow grooves were studied. The study started from a preliminary investigation, where a relationship between some factors related to the process pulsed GMAW and the irregularity of bead was verified. Starting from this investigation, a series of tests took place to identify the mechanisms involved in the weld beads irregular formation. For this, a filming camera was used with high-speed of images reception (2000 frames/s). The results showed that to have the bead regular formation, it is necessary a certain minimum volume of metal should be deposited to fill the groove bottom (besides the other welding parameters be maintained optimum). Besides, the results also showed that, due to the largest proximity of the electrode tip to the groove walls than with the joint bottom, an arc deviation happened, what promoted a drop deviation for the groove walls, causing a metal transfer instabilization. The arc deviation for the groove walls and the low deposition volume causes a bad distribution of heat in the joint, generating irregular beads.

Keywords: Pulsed GMAW, Automated, bead irregularity, Narrow groove, Metal transfer.