

## Influência da Velocidade de Soldagem sobre as Geometrias dos Cordões de Solda Realizados Através dos Processos de Soldagem FACW e Soldagem Híbrida (TIG/FACW)

Richard Thomas Lermen (FAHOR) [richard@fahor.com.br](mailto:richard@fahor.com.br)

### Resumo

*O presente trabalho tem como objetivo analisar a influência da velocidade de soldagem na geometria dos cordões de solda realizados através de dois diferentes processos de soldagem, soldagem a arco elétrico com arame tubular FACW – “Flux Cored Arc Welding” e soldagem híbrida TIG – Tungsten Inert Gas/FACW. Para os dois processos, cinco variações na velocidade de soldagem foram realizadas, mantendo constante as outras grandezas físicas, tais como: intensidade de corrente elétrica, tensão, fluxo de gás, entre outras. A penetração e a largura do cordão de solda foram as dimensões analisada. A penetração do cordão de solda em função da velocidade de soldagem apresentou um comportamento irregular e a largura do mesmo diminuiu com o aumento da velocidade de soldagem, sendo que foi maior para o processo híbrido em relação ao processo convencional FACW.*

*Palavras-chave: Soldagem híbrida; FACW; Velocidade de soldagem; Geometria cordão de solda.*

### 1. Introdução

A velocidade soldagem é um parâmetro que possui uma grande influência na geometria do cordão de solda. Quando excessivamente grande, torna um cordão convexo com bordas irregulares e diminui a penetração. Se a velocidade for muito pequena, há inclusão de escoria e cordão irregular. Outrossim, a velocidade é um importante fator na determinação da energia de soldagem, pois pode atuar num grande intervalo (Machado, 1996).

Outro fator que influencia na geometria do cordão de solda é a utilização de pré-aquecimento e pós-aquecimento. Ambos podem ser realizados com a utilização de dois processos simultaneamente, TIG – “Tungsten Inert Gas” e Arame tubular – FACW (“Flux Cored Arc Welding”), o qual pode ser chamado de processo híbrido (Messeler, 2004). Nesse processo o TIG atua como fonte de pré-aquecimento ou pós-aquecimento da peça. O pré-aquecimento é fundamentalmente realizado, ou para reduzir a taxa de resfriamento, de forma a que não se desenvolvam trincas na junta soldada; ou para compensar a excessiva taxa com que o calor gerado pelo arco é dissipado, impedindo a

formação de uma conveniente poça de fusão; e ou, ainda, para diminuir as deformações geradas pela soldagem. O pós-aquecimento é, principalmente, utilizado para melhorar as propriedades mecânica/metalúrgicas das juntas; e/ou prevenir a ocorrência de defeitos, auxiliando na difusão do hidrogênio; e/ou aliviar as tensões geradas pela soldagem (RAYES *et al.*, 2004; ALORAIER *et al.* 2006).

Portanto, o principal objetivo deste artigo é apresentar a influência da velocidade de soldagem sobre a geometria do cordão de solda realizados através dos processos FACW e híbrido (TIG/FACW).

## 2. Revisão da Literatura

### 2.1 Breve Histórico

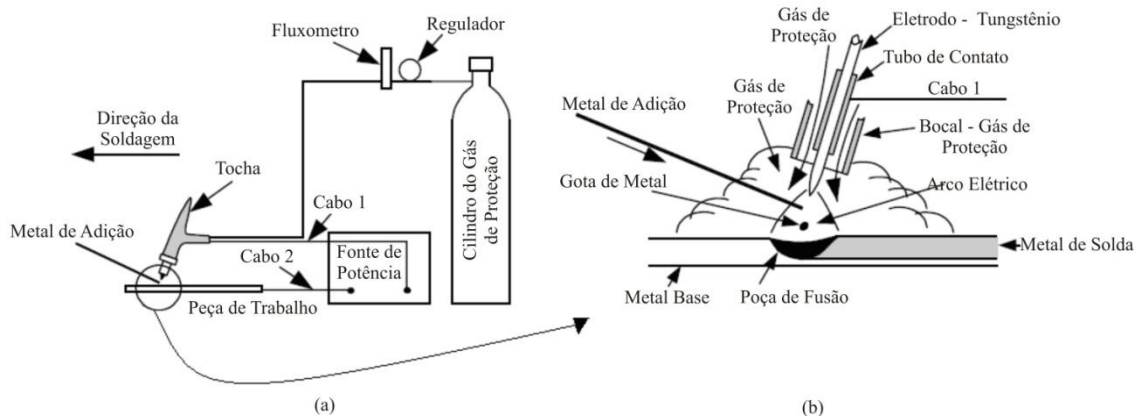
A utilização da soldagem híbrida para processamento de materiais vem sendo desenvolvida desde os anos de 1970 (Messler, 2004). A utilização e desenvolvimento dos processos de soldagem híbrida podem ser apresentados através da seguinte cronologia:

- 1972. União do processo PAW (“Plasma Arc Welding”) com MIG (“Metal Inert Gas”)/MAG (“Metal Active Gas”), ou também conhecida como GMAW (“Gas Metal Arc Welding”);
- 1978. Soldagem com dois feixes de elétrons atuando simultaneamente;
- 1979. Soldagem LASER com soldagem TIG (“Tungsten Inert Gas”), também conhecida como GTAW (“Gas Tungsten Arc Welding”);
- 1987. Soldagem com dois feixes LASERs atuando simultaneamente;
- 1991. Soldagem LASER com soldagem MIG/MAG;
- 1998. Soldagem LASER com Soldagem Plasma – PAW;
- 2001. Soldagem LASER CO<sub>2</sub> de baixa potência com TIG;
- 2002. Soldagem LASER com FSW (“Friction Stir Welding”).
- Soldagem GTAW ou TIG

### 2.2 Soldagem TIG ou GTAW

O processo de soldagem GTAW (“Gas Tungsten Arc Welding”), mais conhecido no Brasil como TIG (“Tungsten Inert Gas”), é caracterizado por utilizar um arco elétrico, o qual é formado entre um eletrodo não consumível e a peça, onde a poça de fusão e o eletrodo são protegidos da ação da atmosfera por um gás geralmente inerte (argônio ou hélio). Esse arco elétrico atua somente como fonte de calor para fundir os metais podendo ser adicionado um metal de adição manualmente (arame) ou automaticamente (arame fino). A **Figura 1** ilustra esquematicamente o sistema utilizado, onde a **Figura 1a**

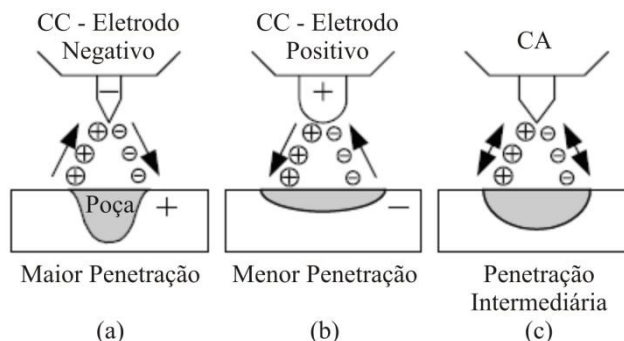
apresenta os equipamentos pertinentes ao processo (“tocha”, cilindro de gás, fonte de potência, etc.) e a **Figura 1b** detalha o processo (Machado, 1996; Kou, 2002).



**Figura 1.** Processo de soldagem TIG: (a) equipamentos constituintes do processo e (b) região da soldagem. Fonte: Kou (2002).

Neste processo a extremidade do eletrodo, a qual fica exposta para fora do bocal, tem influência significativa na poça de fusão, isto é, em corrente contínua a extremidade do eletrodo deve ser cônica, ou seja, quanto mais aguda for a extremidade maior a penetração e menor a largura (Machado, 1996; Kou, 2002).

A fonte de potência, no processo TIG, possui curva característica do tipo corrente constante (“tombante”) para processos manuais, onde opera com corrente contínua e corrente alternada. Sendo assim, a distribuição de calor e a penetração também dependem da polaridade. A **Figura 2** apresenta três diferentes tipos de polaridades para o processo TIG (Kou, 2002).



**Figura 2.** Diferentes tipos de polaridade para o processo de soldagem TIG. Fonte: Kou (2002).

A **Figura 2a** apresenta o tipo de corrente contínua com eletrodo polaridade negativa (CCEN), sendo o mais utilizado na soldagem TIG. Nesse caso, do

calor total gerado, cerca de 30% é produzido no eletrodo e 70% na peça, ocorrendo a maior penetração entre as três polaridades. A poça formada é estreita e profunda, o que pode ser indesejável em peças muito finas. Diferentemente das outras polaridades, esta não provoca ação de limpeza de óxidos superficiais na poça de fusão. Também, se o eletrodo for de tungstênio puro, há oscilação de pontos catódicos sobre a superfície do mesmo, causando instabilidade do arco. Para a polaridade do tipo corrente contínua eletrodo positivo (CCEP), representado pela **Figura 2b**, torno de 70% do calor total é gerado no eletrodo e 30% na peça, resultando na menor penetração entre todos os casos, com a poça de fusão rasa e larga. Apesar de produzir um arco com menor temperatura, a CCEP pode ser de interesse naquelas situações em que se deseja pouca penetração e eficiente remoção dos óxidos superficiais que se formam sobre a poça de fusão, pois há oscilação de pontos catódicos sobre a mesma. Essa vantagem se aplica para poucos metais, tal como o alumínio, sendo geralmente preferível soldar em corrente alternada, a qual provoca efeito similar, requer menor treino do soldador e pode conduzir mais alta corrente para uma mesma bitola de eletrodo. Já para o tipo de polaridade corrente alternada (CA), **Figura 2c**, a distribuição de do calor total é aproximadamente igual entre o eletrodo e a peça, com a penetração sendo intermediária entre CCEN e CCEP (Machado, 1996).

Uma característica importante deste processo é o excelente controle do calor cedido à peça, devido ao controle independente da fonte de calor e da adição de metal de enchimento, semelhante ao que ocorre na soldagem por oxigás. Isto torna o processo adequado para a soldagem de peças com pequena espessura e, aliado à eficiente proteção contra a contaminação, à soldagem de materiais de difícil soldabilidade (Machado, 1996).

As principais variáveis operatórias da soldagem TIG são: o comprimento do arco, a intensidade de corrente elétrica, a velocidade de soldagem e a vazão do gás de proteção. Outras variáveis operatórias na soldagem TIG, com influência secundária, dentro de certos limites, são: o ângulo da ponta do eletrodo, a distância do bocal à peça e os tempos de pré e pós-purga de gás (Machado 1996).

A determinação dos parâmetros de soldagem é feita em função do material a ser soldado, da espessura das peças, da posição de soldagem e dos equipamentos disponíveis, bem como a decisão do uso ou não de metal de adição. Por exemplo, através desse processo uma chapa de aço inoxidável, com espessura de 1,2 mm, pode ser soldada com os seguintes parâmetros: intensidade de corrente de 40 A à 60 A; a polaridade CCEN (corrente contínua com eletrodo negativo) ou CA (corrente alternada); e vazão do gás de 5 l/min (Machado, 1996; Kou, 2002).

### 2.3 Soldagem por Arame Tubular

A soldagem a arco com arame tubular (“Flux-Cored Arc Welding” – FCAW) é um processo que produz a coalescência de metais pelo aquecimento destes

com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo tubular, contínuo, consumível e a peça de trabalho (Marques *et al.*, 2005).

A proteção do arco e do cordão de solda é feita por um fluxo de soldagem contido dentro do eletrodo, que pode ser suplementada por um fluxo de gás fornecido por uma fonte externa. Além da proteção, os fluxos podem ter outras funções, semelhantes às dos revestimentos de eletrodos, como desoxidar e refinar o metal de solda, adicionar elementos de liga, estabilizar o arco, etc. (Marques *et al.*, 2005).

Existem duas variações básicas do processo arame tubular, uma em que toda a proteção necessária é gerada pelo próprio fluxo contido no eletrodo, (autoprottegido) e outra em que a proteção é complementada por uma nuvem de gás, geralmente o CO<sub>2</sub> (Marques *et al.*, 2005).

A soldagem com arames tubulares é normalmente um processo semiautomático e muito semelhante ao processo MIG/MAG, no que diz respeito a equipamentos e princípios de funcionamento. Por outro lado, o processo também tem suas semelhanças com a soldagem com eletrodos revestidos, do ponto de vista metalúrgico (Marques *et al.*, 2005).

Assim, a soldagem com arames tubulares é um processo que acumula as principais vantagens da soldagem MIG/MAG, como alto fator de trabalho do soldador, alta taxa de deposição e alto rendimento, que resultam em grande produtividade e as vantagens da soldagem com eletrodos revestidos como a alta versatilidade, possibilidade de ajustes de composição química do metal de solda e facilidade de operação em campo (Marques *et al.*, 2005).

A rigor, o processo arame tubular apresenta características em termos de flexibilidade e produtividade superiores e às vezes bastante superiores às da soldagem com eletrodos revestidos e MIG/MAG (Marques *et al.*, 2005).

## 2.4 Soldagem Híbrida

A soldagem híbrida é caracterizada pela utilização simultânea de dois ou mais processos de soldagem, por exemplo, soldagem LASER com MIG/MAG, soldagem PAW com MIG, LASER com TIG, etc. O uso simultâneo pode afetar o funcionamento de cada um dos processos e o formato final do cordão de solda (Messler, 2004; El Rayes *et al.*, 2004).

O processo de soldagem híbrida vem sendo empregado, geralmente, na construção de navios e também na indústria automobilística (Reutzei *et al.*, 2006; Graf e Staufer, 2003), apresentando as seguintes vantagens:

- Realiza soldagem com altas velocidades, conseqüentemente aumentando a produtividade no meio industrial;
- As soldas realizadas apresentam excelentes propriedades mecânicas e metalúrgicas comparadas com as soldas realizadas através dos processos convencionais;



- Esse processo possibilita a realização de soldagem de chapas espessas com apenas um passe – diminuindo as distorções térmicas, diferentemente dos processos ditos convencionais, onde há a necessidade de múltiplos passes;
- Pequenas zonas afetadas pelo calor são encontradas.

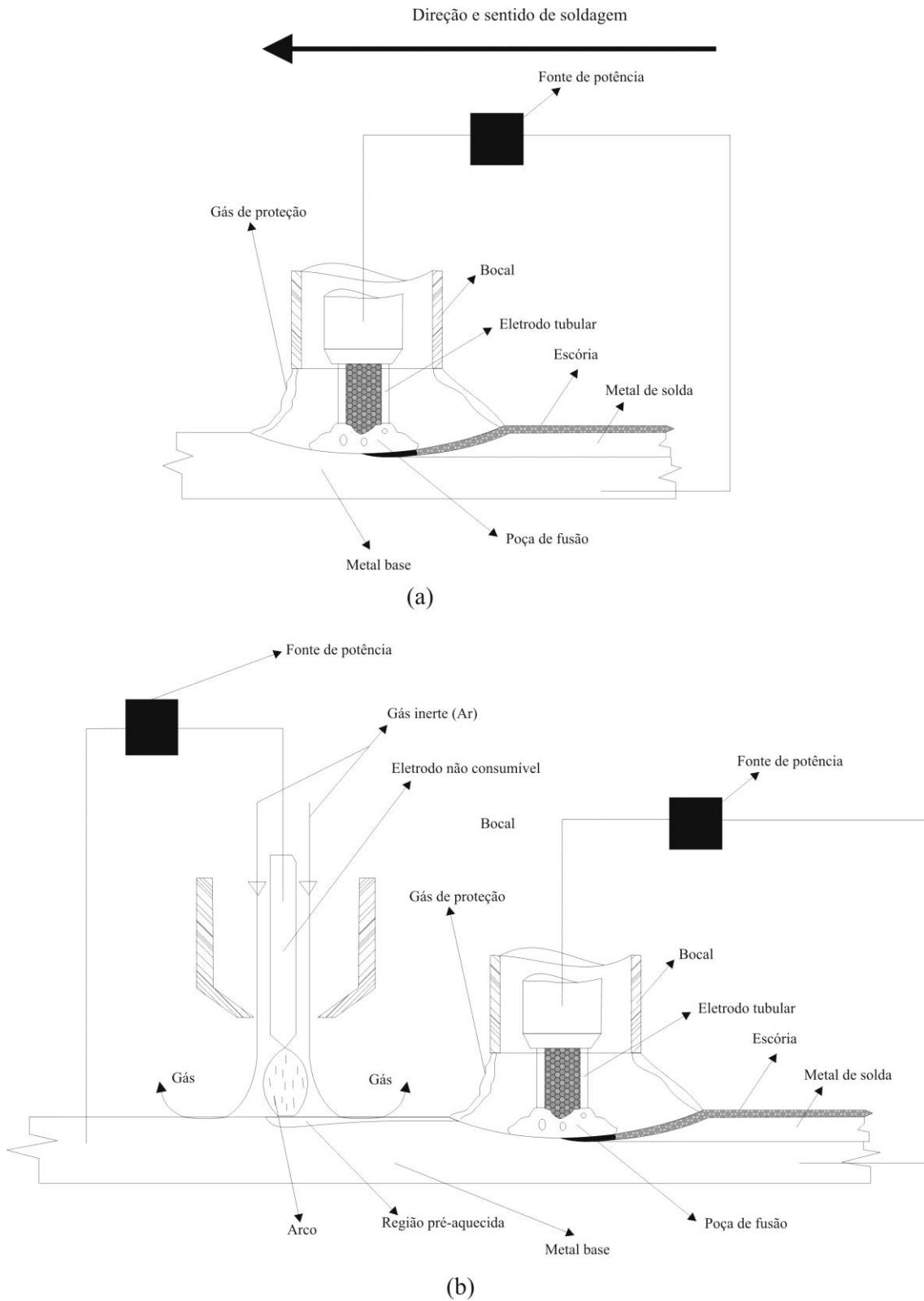
### 3. Métodos e Técnicas

Os processos de soldagem foram realizados através de um dispositivo de deslocamento com controle de velocidade, onde as tochas (TIG e FACW) e as chapas de aço foram fixadas. Essas chapas tinham dimensões de 120x50x5 mm e composição química indicada na **Tabela 1**.

**Tabela 1.** Composição química das chapas de aço utilizadas nos processos de soldagem.

Elemento Químico	C	Si	Mn	P	S	Ni	Al	Fe
Concentração	0,48	0,24	0,75	0,017	0,013	0,013	0,06	98,42

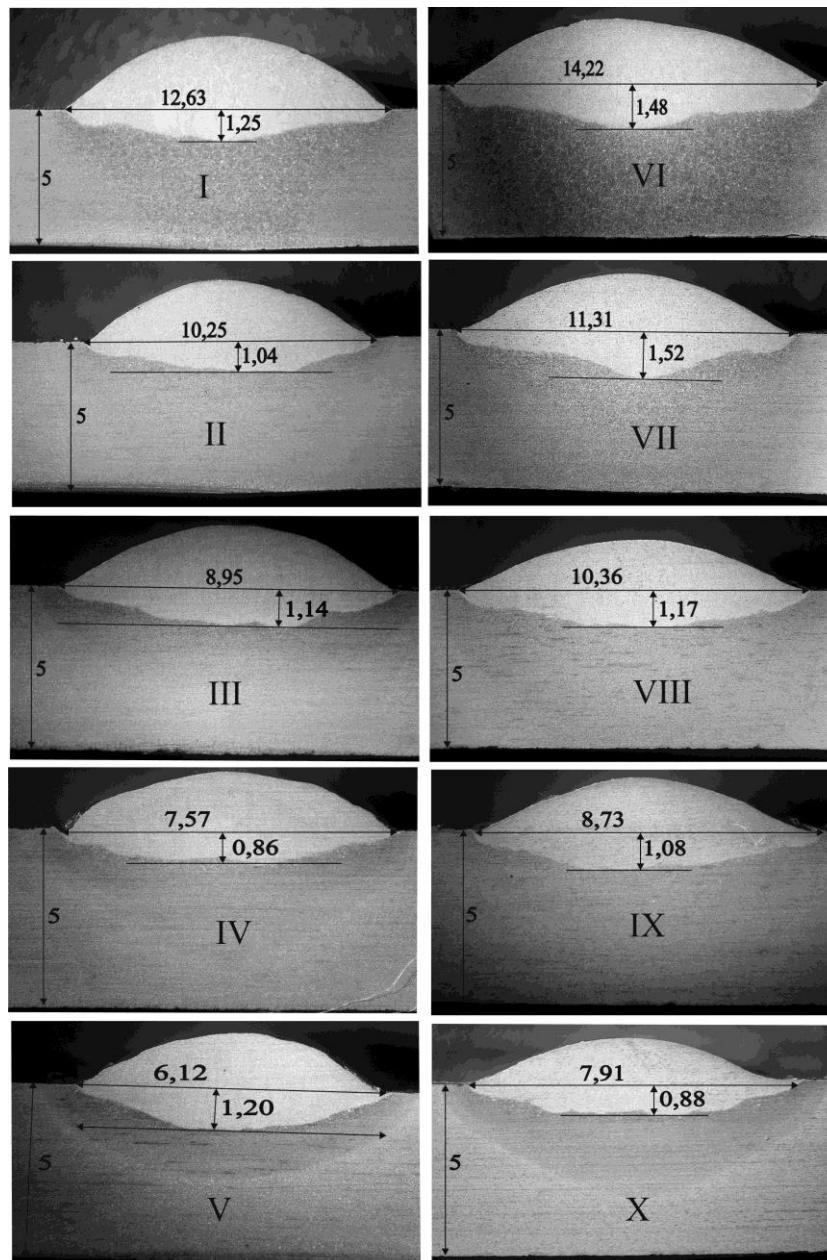
O desenho esquemático dos processos de soldagem é apresentado na **Figura 3**, onde a **Figura 3a** representa a soldagem a arco com arame tubular – FACW, na qual foi utilizado arame com classificação AWS 71T1-9 de 1,2 mm de diâmetro e foi realizada com as seguintes configurações: corrente elétrica (CCEP) de 130 A; tensão de 29 V; velocidade de alimentação do arame de 4,6 m/min; vazão do gás de proteção (CO<sub>2</sub>) de 10 l/min; e distância entre o bocal e a chapa de 25 mm. A **Figura 3b** apresenta o desenho esquemático dos processos TIG e FACW agindo simultaneamente, onde o TIG teve como função o pré-aquecimento da chapa. No processo híbrido, os parâmetros utilizados para o processo FACW foram iguais aos utilizados anteriormente (processo convencional FACW), e para o TIG, onde foi utilizado um eletrodo AWS E WTh – 2 com 2,4 mm de diâmetro, foi realizado com as seguintes configurações: intensidade de corrente elétrica (CCEN) de 70 A; vazão do gás (Ar) de 10 l/min; e distância entre o eletrodo e a chapa de 5 mm. A distância entre o eletrodo do TIG e o arame do FACW foi de 10 mm. Para ambos os processos, as velocidades de soldagem empregadas foram de 0,30; 0,46; 0,63; 0,87 e 1,14 mm/s. Os corpos de prova foram cortados, lixados, polidos e atacados com nital 5% para análise macroscópica dos cordões de solda. As dimensões dos cordões de solda foram determinadas através do software imageJ.



**Figura 3.** Desenho esquemático dos processos de soldagem (a) FACW e (b) TIG/FACW.

#### 4. Resultados e discussões

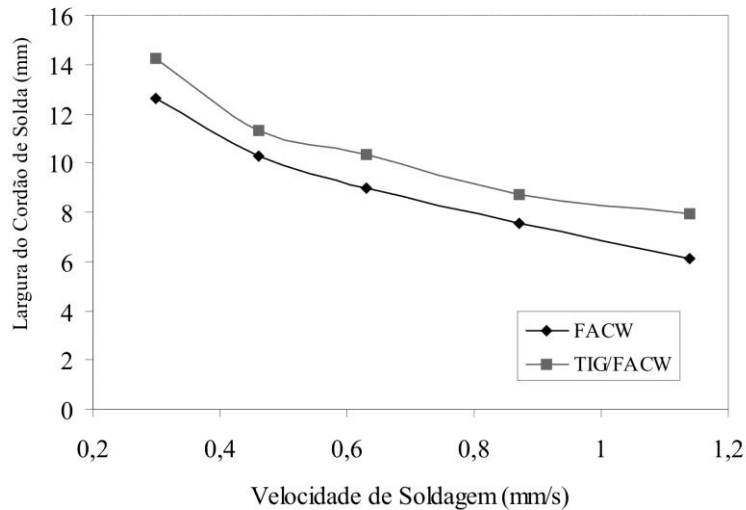
A **Figura 4** mostra as macroestruturas das soldas realizadas com o processo de soldagem FACW (I, II, III, IV e V) e com o processo de soldagem híbrido TIG/FACW (VI, VII, VIII, IX e X), ambos realizados com as respectivas velocidades de soldagem: 0,30 mm/s (I e VI); 0,46 mm/s (II e VII); 0,63 mm/s (III e VIII); 0,87 mm/s (IV e IX) e 1,14 mm/s (V e X).



**Figura 4.** Macroestrutura das soldas realizadas com os processos FACW (I, II, III, IV e V) e TIG/FACW (VI, VII, VIII, IX e X). A velocidade de soldagem aumenta de cima para baixo para ambos os processos (I=VI>II=VII>III=VIII>IV=IX>V=X).

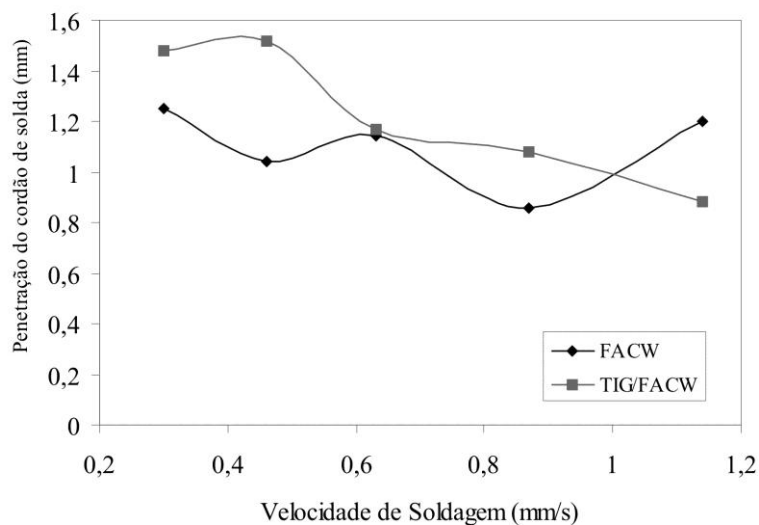


O aumento da largura do cordão de solda também pode ser analisado através da **Figura 5**, a qual mostra o gráfico da largura do cordão de solda em função da velocidade de soldagem para ambos os processos.



**Figura 5.** Gráfico da largura do cordão de solda em função da velocidade de soldagem para ambos os processos.

A penetração do cordão de solda em função da velocidade de soldagem é mostrada através da **Figura 6**. Neste caso observa-se um comportamento irregular para os processos FACW (III e V) e TIG/FACW (VII), onde o aumento da velocidade de soldagem causou um aumento da penetração do cordão de solda, ou seja, mesmo com a diminuição da energia de soldagem observou-se aumento na penetração do cordão de solda.



**Figura 6.** Gráfico da penetração do cordão de solda em função da velocidade de soldagem para os processos FACW e TIG/FACW.

#### 4. Conclusão

Através deste trabalho constatou-se que a largura do cordão de solda diminui com o aumento da velocidade de soldagem, sendo que a mesma foi maior no processo híbrido (TIG/FACW) do que no processo convencional FACW, isso para as mesmas velocidades.

A penetração do cordão de solda teve um comportamento irregular com o aumento da velocidade de soldagem, mesmo assim foi maior para o processo híbrido de soldagem, com exceção da soldagem realizada com maior velocidade (1,14 mm/s), onde a penetração é maior no processo FACW.

Entretanto, o processo de soldagem híbrido, isto é, dois ou mais processos de soldagem combinados sendo utilizados simultaneamente apresentou a vantagem de obter maior penetração e largura do cordão com maiores velocidades de soldagem. Sendo este um processo em desenvolvimento, estudos futuros devem ser realizados com o propósito de otimizar o mesmo (minimização de custo, aumento da precisão e da eficiência).

#### 5. Referências

- ALORAIER, A., IBRAHIM, R. e THOMSON P. FCAW Process to Avoid the Use of Post Weld Heat Treatment. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 83, p. 394 – 398, 2006.
- EL RAYES, M., WALZ, C. e SEPOLD, G. The Influence of Various Hybrid Welding Parameters on Bead Geometry. **Welding Journal**, v. 83, n. 5, May 2004.
- GRAF, T. e STAUFER, H. Laser-Hybrid Welding Drives VW Improvements. **Welding Journal**, v. 82, n. 1, January, 2003.
- KOU, S. (2002) **Welding Metallurgy**. John Wiley & Sons, INC, Second Edition.
- MACHADO, I.G. (1996) **Soldagem & Técnicas Conexas – Processos**. Editado pelo autor, Porto Alegre.
- MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. (2005) **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. Editora UFMG, Belo Horizonte.
- MESSLER, R. W. JR. What's Next for Hybrid Welding? **Welding Journal**, v. 83 no. 3, March, 2004.
- RAYES, M.E., WALZ, C. e SEPOLD, G., The Influence of Various Hybrid Welding Parameters on Bead Geometry. **Welding Journal**, v. 83 no. 5, May, 2004.
- REUTZEI, E.W., SULLIVAN, M.J. e MIKESIC, D.A. Joining Pipe with the Hybrid Laser – GMAW Process: Weld Test Results and Cost Analysis. **Welding Journal**, v. 85, n. 6, June, 2006.