

## USO DA TAXA DE FUSÃO NA DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS PARA SOLDAGEM MIG COM POLARIDADE VARIÁVEL.

### Alexandre Saldanha do Nascimento (Doutorando)

Universidade Federal de Uberlândia, Departamento de Engenharia Mecânica, Uberlândia, MG, Brasil  
asnascimento@mecanica.ufu.br

### Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho (Orientador)

Universidade Federal de Uberlândia, Departamento de Engenharia Mecânica, Uberlândia, MG, Brasil  
vilarinho@mecanica.ufu.br

**Resumo:** O desenvolvimento de fontes eletrônicas de soldagem tem permitido o estudo de processos inovadores, geralmente com o objetivo de melhorar a capacidade de produção aliada a baixos níveis de aporte térmico. Os processos existentes são baseados no modo de transferência metálica e no desenvolvimento de formas de ondas que melhorem o controle do processo. O processo MIG-PV (Polaridade Variável) pulsado é um processo derivativo do MIG convencional que alia as vantagens do uso de polaridade positiva, como a boa estabilidade de arco e limpeza catódica, com as fornecidas pela polaridade negativa, que seria principalmente a elevada taxa de fusão do eletrodo e baixo aporte térmico ao metal de base. No entanto, este processo ainda possui uso limitado devido à escassez de publicações técnicas e científicas. Desta forma, neste trabalho é apresentada uma proposta de uma metodologia para determinação de parâmetros de soldagem em quatro formatos de onda diferentes e variando a taxa de eletrodo negativo em três níveis, de modo a fornecerem estabilidade de arco e de transferência metálica, a avaliação do processo foi realizada através de filmagens do arco e análise das características geométricas do cordão. O método se revelou bastante eficaz com resultados satisfatórios de estabilidade.

**Palavras-chave:** Corrente Alternada. Pulsada. Eletrodo negativo.

## 1. INTRODUÇÃO

O processo MIG-CA (Corrente Alternada) é também conhecido por MIG-PV (MIG Polaridade Variável) ou ainda GMAW-VP (Variable Polarity Gas Metal Arc Welding), onde o termo “Polaridade Variável” é mais exatamente usado para descrever formas de onda nas quais a razão das duas polaridades pode ser variada. Já o termo CA, normalmente é usado para descrever uma onda senoidal, apesar de que também pode ser usado para descrever uma corrente que alterna entre polaridades positiva e negativa.

Polaridade Variável é mais exatamente usada para descrever formas de onda nas quais a razão das duas polaridades pode ser variada.

O processo de soldagem MIG CA combina as vantagens da soldagem MIG convencional (DCEP) com o aumento na taxa de fusão e redução do aporte térmico que ocorre quando o processo MIG é operado com o eletrodo no modo polaridade negativa (DCEN) (Mulligan, 2003). A Figura 1 apresenta as principais características do arco em ambas as polaridades.

Polaridade negativa ou combinação de polaridades têm sido usadas com sucesso em processos que utilizam fluxo, como Eletrodo Revestido, Arame Tubular e Arco Submerso. O uso de polaridade negativa (DCEN) para controlar o aporte térmico sobre o metal base e penetração nesses processos tem gerado interesse similar para MIG. No entanto, um obstáculo que tem limitado o uso de DCEN e polaridade variável (ou CA) em MIG é o problema de instabilidade do arco que acompanha o uso de polaridade negativa.

Esse problema é facilmente resolvido pela adição de elementos estabilizantes em processos que usam fluxo. Problemas de instabilidade em arame nu (MIG) são mais difíceis de resolver do que com os processos que usam fluxo, por isso, a soldagem com arame maciço é operada quase exclusivamente com polaridade positiva.

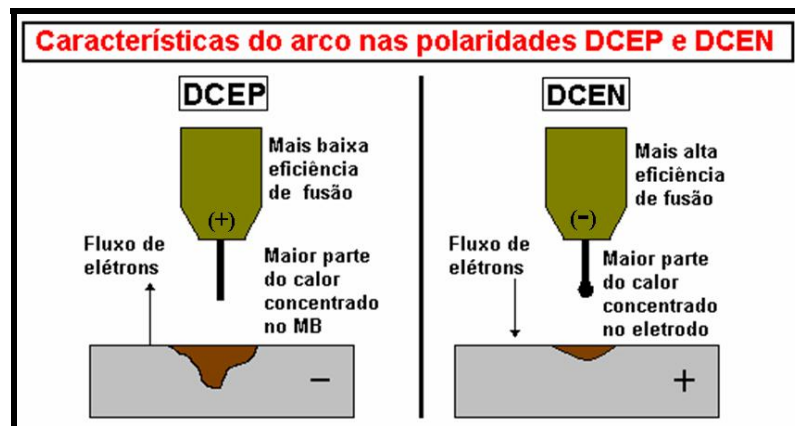


Figura 1 - Características do arco nas polaridades positiva e negativa.

Polaridade DCEN é usualmente limitada para transferência globular e é raramente usada porque o arco resultante é instável e com nível de salpicagem inaceitável.

A maioria dos problemas inerentes ao uso de DCEN em MIG é a forte força repulsiva que age na gota na ponta do arame eletrodo (cátodo) conforme ilustrado na Figura 2.

Ativação do eletrodo tem sido empregada para melhorar a eficiência de emissão de elétrons e estabilizar os pontos catódicos em DCEN. Isto é feito através da adição de Metais Alcalinos (alkali) e de terras raras no arame, mas é um método caro e de pouca aceitação.

O uso de misturas de gás de proteção tais como argônio e gás ativo como oxigênio e dióxido de carbono têm sido reportados ajudar no sucesso da operação de arcos em DCEN. Isto é usualmente possível somente em correntes relativamente altas.

Para superar os problemas de reignição de arco quando a corrente passa pelo zero durante a mudança de polaridade em CA, altos picos de tensão são aplicados para manter a ionização na coluna de arco, deste modo ajudando a reignição. Contudo a alta tensão tem sempre sido uma preocupação de segurança (Talkington, 1998).

Segundo Harwig (2000) os valores de tensão aplicados quando a corrente passa pelo zero depende do teor de dióxido de carbono no gás de proteção, podendo passar de 400 V como mostra o gráfico da Figura 3.

Com o avanço da eletrônica houve solução para os problemas do passado com CA. A tecnologia de inversores tem tornado possível e econômico produzir fontes capazes de gerar quase todas as formas de onda concebíveis.

Problemas, tais como reignição de arco quando a corrente passa pelo zero, são facilmente eliminados pelo uso de forma de onda retangular a qual reduz a quantidade de tempo que a corrente está no ou próxima do zero. Esta vantagem elimina a necessidade de arriscadas alta tensões necessária para evitar os problemas de reignição com formas de onda senoidal.

Características como: baixo aporte de calor, controle sobre a geometria do cordão, baixa deformação e mais alta taxa de fusão comparado ao DCEP, têm despertado a atenção principalmente da indústria automotiva. No entanto, ainda há pouca publicação técnica e científica sobre o assunto, o que contribui para a baixa popularidade do processo. Além disso, a dificuldade em se determinar parâmetros que forneçam boa estabilidade de arco e de transferência metálica ajudam a desencorajar investimentos em MIG-PV. Desta forma, neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia para determinação de parâmetros em MIG-PV para quatro formatos de onda diferentes e variando a taxa de eletrodo negativo (%EN) em três níveis. Portanto, a proposição deste trabalho, para uma investigação mais aprofundada dos efeitos dos parâmetros de soldagem sobre o desempenho operacional do processo e a qualidade do metal depositado, certamente contribuirá de

forma significativa para o desenvolvimento do conhecimento e aplicações particulares otimizadas, promovendo a popularização do processo nos diversos segmentos da indústria.

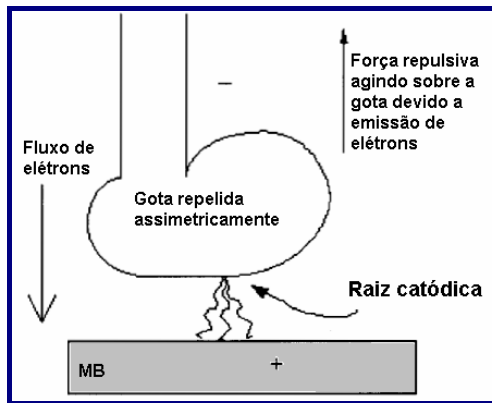


Figura 2 – Força repulsiva sobre a gota em DCEN.

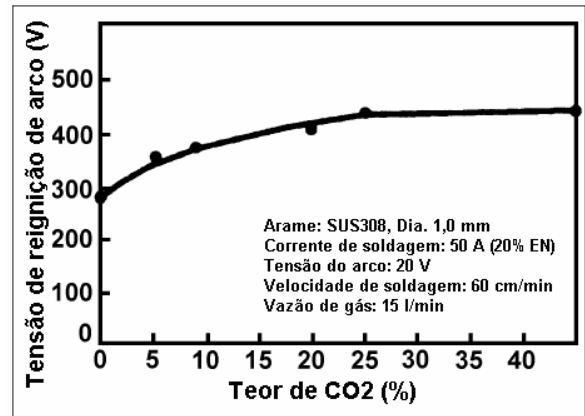


Figura 3 – Gráfico da tensão de reabertura de arco em função do teor de CO<sub>2</sub>.

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste trabalho foi realizado um estudo dos principais parâmetros utilizados no processo MIG-PV, afim de definir uma metodologia que permita determinar tais parâmetros de forma a se obter boa estabilidade de arco e de transferência metálica. Além disso, foi realizada uma avaliação do efeito do formato de onda e da taxa de eletrodo negativo (%EN) sobre as características geométricas do cordão de solda. Portanto, para melhor entendimento, o trabalho será subdividido em três etapas descritas a seguir:

### ETAPA 1: Determinação da Equação do Consumo nas polaridades Positiva e Negativa.

A Equação da taxa de fusão:  $V_{al} = \alpha \cdot I_m + \beta \cdot L \cdot I_{ef}^2$  é uma função das constantes  $\alpha$  e  $\beta$ , que se traduz numa estimação de parâmetros não-linear (regressão não linear), a partir da determinação experimental dos outros termos da equação.

O conhecimento da equação do consumo em ambas as polaridades é fundamental para evitar a variação de comprimento de arco que ocorre durante a mudança de polaridade e consequentemente instabilidades de arco. Portanto, foram realizados experimentos tanto na polaridade positiva quanto na negativa, onde se variou valores de velocidade de alimentação de arame, mantendo constante o comprimento de arco e os valores resultantes de corrente média ( $I_m$ ) e corrente eficaz ( $I_{ef}$ ) foram então registrados.

Foram feitos cordões em simples deposição sobre barra chata (aço) 250x37x6 mm, com metal de adição da classe AWS ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro usando como gás de proteção Argônio-2%O<sub>2</sub> com vazão de 15 l/min.

Finalmente, com os dados obtidos experimentalmente, foi usado um software comercial (Statistica) para fazer uma regressão não linear e determinar os valores das constantes  $\alpha$  e  $\beta$ .

### ETAPA 2: Determinação de Parâmetros que Garantam Estabilidade de Comprimento de Arco.

Um dos principais motivos que geram instabilidades na soldagem MIG-PV, é a mudança de comprimento de arco que ocorre juntamente com a inversão de polaridade, já que a taxa de fusão na polaridade negativa (DCEN) é maior que na positiva (DCEP). Potanto, para conseguirmos um comprimento de arco constante, foi criada uma metodologia para determinação dos parâmetros fundamentada na condição de que a taxa de fusão na polaridade positiva seja igual na negativa, por isso, a importância do conhecimento da equação da taxa de fusão.

O metal de base, de adição e gás de proteção foram os mesmos da etapa anterior, mas agora foram variados dois parâmetros fundamentais em soldagem MIG-PV:

**Formato de onda:** Foram avaliados quatro tipos de onda diferentes encontrados na literatura, como mostra a Figura 4, com o intuito de verificar o efeito da mudança brusca de polaridade sobre a estabilidade do arco.

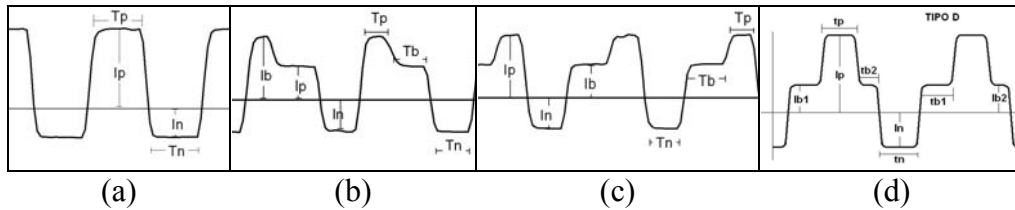


Figura 4 – Formatos de onda estudados, (a) tipo A, (b) tipo B, (c) tipo C e (d) tipo D.

**Taxa de EN:** Foram avaliados três níveis de percentual de Eletrodo Negativo, **30, 50 e 70%**, para verificar seu efeito sobre a transferência metálica. O %EN é definido pela razão entre o tempo em que o eletrodo opera na polaridade negativa e o período (tempo no negativo mais o tempo no positivo), como mostra a equação 1.

$$\%EN = \frac{t_{EN}}{t_{EN} + t_{EP}} \quad (1)$$

Com os fatores de influência definidos, foi montada uma estratégia de cálculo para determinar os parâmetros que garantam estabilidade de arco e de transferência metálica, e comprimento de arco constante.

#### **Estratégia de cálculo:**

Definir corrente de pulso ( $I_p$ ) e tempo de pulso ( $t_p$ ) que garanta uma gota por pulso (UGPP);

Definir corrente de base ( $I_b$ ) obedecendo o critério da estabilidade de arco ( $I_b > 20A$ );

Definir tempo de base ( $t_b$ ) conforme %EN requerido;

Calcular corrente negativa ( $I_n$ ) para os formatos de onda, igualando as taxas de fusão ( $V_{al+} = V_{al-}$ );

Calcular tempo no negativo ( $t_n$ ) para os níveis de %EN requeridos, através da Equação 2:

$$t_n = \frac{\%EN \cdot t_p}{(1 - \%EN)} \quad (2)$$

onde:  $t_p$  = tempo total na polaridade positiva.

#### **Os recursos básicos utilizados nesta etapa foram:**

Fonte de soldagem multiprocessos;

Mesa de deslocamento automático;

Duas câmeras de filmagem em alta velocidade;

Equipamentos para aquisição de sinais de tensão e corrente sincronizados com o sinal das câmeras;

Software de controle (SAC) da fonte que permite o desenho de qualquer formato de onda.

### **ETAPA 3: Avaliar a influência de Formas de Onda e %EN diferentes, sobre a Geometria e o Aspecto Superficial dos cordões.**

Com os parâmetros obtidos na etapa 2 foram feitas soldas em simples deposição mantendo constante a relação velocidade de alimentação de arame pela velocidade de soldagem ( $V_{al}/V_{sol}$ ) e foram avaliadas as características geométricas do cordão (penetração, largura e reforço) e o aspecto superficial quanto à quantidade de respingos.

## **3. RESULTADOS**

### 3.1. Resultados da Etapa 1: Determinação da Equação do Consumo nas Polaridades Positiva e Negativa.

As Tabelas 1 e 2 apresentam os resultados experimentais de corrente média e eficaz para as polaridades positiva e negativa respectivamente.

Tabela 1 – Valores dos Resultados Experimentais em DCEP\*.

| Im (A) | Ief (A) | Valim (m/s) | L (m) |
|--------|---------|-------------|-------|
| 139    | 139     | 0,0500      | 0,015 |
| 171    | 171     | 0,0667      | 0,015 |
| 170    | 170     | 0,0667      | 0,015 |
| 194    | 194     | 0,0833      | 0,015 |
| 194    | 194     | 0,0833      | 0,015 |
| 218    | 218     | 0,1000      | 0,015 |
| 242    | 242     | 0,1167      | 0,015 |
| 282    | 282     | 0,1333      | 0,015 |

\*Im: Corrente Média; Ief: Corrente Eficaz;  
Valim: Velocidade de alimentação e L: Extensão do Eletrodo.

Tabela 2 – Valores dos Resultados Experimentais em DCEN\*.

| Im (A) | Ief (A) | Valim (m/s) | L (m) |
|--------|---------|-------------|-------|
| 69     | 69      | 0,0500      | 0,015 |
| 117    | 117     | 0,0833      | 0,015 |
| 154    | 154     | 0,1167      | 0,012 |
| 200    | 201     | 0,1500      | 0,012 |
| 198    | 200     | 0,1500      | 0,012 |
| 241    | 246     | 0,1833      | 0,012 |
| 318    | 329     | 0,2167      | 0,012 |
| 297    | 332     | 0,2500      | 0,012 |

\*Im: Corrente Média; Ief: Corrente Eficaz;  
Valim: Velocidade de alimentação e L: Extensão do Eletrodo.

Os valores calculados para  $\alpha$  e  $\beta$  para as duas polaridades foram, no caso da polaridade positiva (DCEP)  $\alpha = 2,74 \times 10^{-4} \text{ [m/ (s.A)]}$  e  $\beta = 5,1 \times 10^{-5} \text{ (s}^{-1} \text{ A}^{-2})$ , que estão coerentes com os encontrados por Norrish (1992) para arame (aço) de 1.2 mm de diâmetro que foram:  $\alpha = 3 \times 10^{-4} \text{ [m/ (s.A)]}$  e  $\beta = 5 \times 10^{-5} \text{ (s}^{-1} \text{ A}^{-2})$ . No caso da polaridade negativa (DCEN), os valores calculados foram  $\alpha = 7,14 \times 10^{-4} \text{ [m/(s.A)]}$  e  $\beta = 1,2 \times 10^{-5} \text{ (s}^{-1} \text{ A}^{-2})$ . Ressalta-se que no caso da polaridade positiva, ambas as constantes tiveram significância estatística para uma confiabilidade de 95%. Entretanto, no caso da polaridade negativa, apenas a constante  $\alpha$  apresentou significância estatística para esta confiabilidade. Uma vez que o principal mecanismo de geração de calor se dá na região catódica, os resultados vieram a corroborar esta afirmação, pois a constante  $\alpha$  se refere a esta geração de calor, ao passo que a constante  $\beta$  está relacionada com o Efeito Joule, que passa a ter menor efeito no caso da DCEN, já que é necessário correntes menores para uma mesma taxa de fusão em DCEP.

### 3.2. Resultados da Etapa 2: Determinação de Parâmetros que Garantam Estabilidade de Comprimento de Arco.

Seguindo a estratégia de cálculo, a corrente e tempo de pulso foram escolhidas com base em relatório interno (UFU) que foram:  $I_p = 300 \text{ A}$   $t_p = 4 \text{ ms}$ . Pelo critério da estabilidade de arco, a corrente de base escolhida foi  $I_b = 40 \text{ A}$ . Os tempos de base foram  $t_{b1} = 2 \text{ ms}$  e  $t_{b2} = 1 \text{ ms}$ .

O valor de corrente negativa é calculado com base na  $I_p$  escolhida que é substituída na equação da taxa de fusão para DCEP, o valor de velocidade de alimentação resultante é usado na equação da taxa de fusão para DCEN, e finalmente obtém-se a corrente negativa para garantir comprimento de arco constante ( $I_n = 198 \text{ A}$ ). As Tabelas 3, 4, 5 e 6 apresentam os parâmetros calculados para os formatos de onda e taxa de eletrodo negativo estudados.

Tabela 3 – Parâmetros calculados para a onda do tipo A.

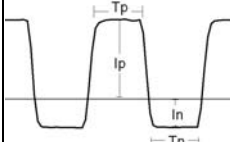
| Onda A                                                                              | $I_p$ (A) | $t_p$ (ms) | $I_n$ (A) | $t_n$ (ms) | %E N |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|------------|-----------|------------|------|
|  | 300       | 4          | 198       | 1,7        | 0,30 |
|                                                                                     | 300       | 4          | 198       | 4,0        | 0,50 |
|                                                                                     | 300       | 4          | 198       | 9,3        | 0,70 |

Tabela 4 – Parâmetros calculados para a onda do tipo B.

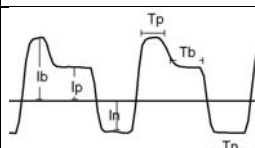
| Onda B                                                                            | $I_p$<br>(A) | $t_p$<br>(ms) | $I_n$<br>(A) | $t_n$<br>(ms) | $I_b$<br>(A) | $t_b$<br>(ms) | %EN  |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|------|
|  | 300          | 4             | 198          | 2,6           | 40           | 2             | 0,30 |
|                                                                                   | 300          | 4             | 198          | 6,0           | 40           | 2             | 0,50 |
|                                                                                   | 300          | 4             | 198          | 14,0          | 40           | 2             | 0,70 |

Tabela 5 – Parâmetros calculados para a onda do tipo C.

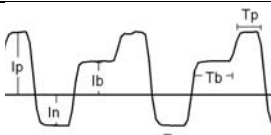
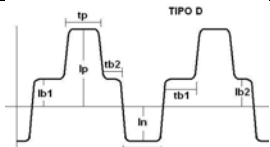
| Onda C                                                                            | $I_p$<br>(A) | $t_p$<br>(ms) | $I_n$<br>(A) | $t_n$<br>(ms) | $I_b$<br>(A) | $t_b$<br>(ms) | %EN  |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|------|
|  | 300          | 4             | 198          | 2,6           | 40           | 2             | 0,30 |
|                                                                                   | 300          | 4             | 198          | 6,0           | 40           | 2             | 0,50 |
|                                                                                   | 300          | 4             | 198          | 14,0          | 40           | 2             | 0,70 |

Tabela 6 – Parâmetros calculados para a onda do tipo D.

| Onda D                                                                             | $I_p$<br>(A) | $t_p$<br>(ms) | $I_n$<br>(A) | $t_n$<br>(ms) | $I_{b1}$<br>(A) | $t_{b1}$<br>(ms) | $I_{b2}$<br>(A) | $t_{b2}$<br>(ms) | %EN  |
|------------------------------------------------------------------------------------|--------------|---------------|--------------|---------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|------|
|  | 300          | 4             | 198          | 3,0           | 40              | 2                | 40              | 1                | 0,30 |
|                                                                                    | 300          | 4             | 198          | 7,0           | 40              | 2                | 40              | 1                | 0,50 |
|                                                                                    | 300          | 4             | 198          | 16,3          | 40              | 2                | 40              | 1                | 0,70 |

Através da análise das filmagens e dos corpos de prova foi possível concluir que para a taxa de eletrodo negativo (%EN) no maior nível, 70%, em todos os formatos de onda, houve muita instabilidade na transferência metálica, com gotas em geral três vezes maior que o diâmetro do eletrodo e com nível inaceitável de respingos, devido à ação intensificada da força repulsiva que atua sobre a gota quando em DCEN. Além disso, o excesso de respingos se acumulava no interior do bocal, reduzindo a área para passagem do gás de proteção, o que causou interrupções do arco e até mesmo o destacamento de gotas para a borda do bocal.

Não foi possível alcançar a condição de UGPP nas soldas realizadas com a onda do tipo A, sem correntes de base positiva para suavizar a inversão de polaridade. Os destacamentos das gotas se deram de forma irregular e instável, com gotas grandes e grande intensidade de salpicos em todos os níveis de %EN.

Para os formatos de onda B, C e D, nos níveis de %EN de 30 e 50% foi possível alcançar a transferência de uma gota por pulso (UGPP), com gotas de diâmetro igual ao do arame. No entanto, a onda do tipo B apresentou cordões com maior nível de salpicagem lateral, devido a base de corrente na polaridade positiva, que tem o intuito de “suavizar” a inversão de corrente, acontecer após a transferência da gota ter ocorrido.

As Figuras 5 a 8 são quadros das filmagens realizadas com duas câmeras de alta velocidade sincronizadas com sinal de corrente e tensão. As quatro figuras são referentes ao nível de %EN de 50%.

A Figura 5 é referente ao tipo de onda A e 50%EN e pode ser visualizado que a gota destacada é bem maior que o diâmetro do eletrodo, devido às forças repulsivas que retardam o destacamento, além disso o destacamento ocorreu na polaridade negativa, mas não regularmente.

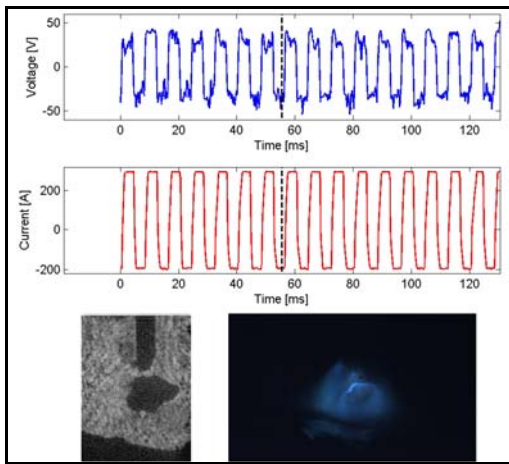


Figura 5 – Quadro de filmagem com onda A e 50%EN.

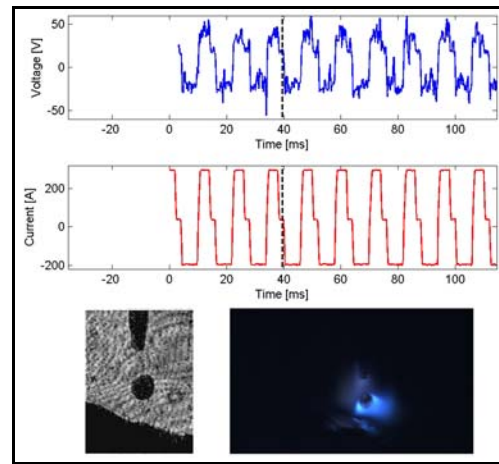


Figura 6 – Quadro de filmagem com onda B e 50%EN.

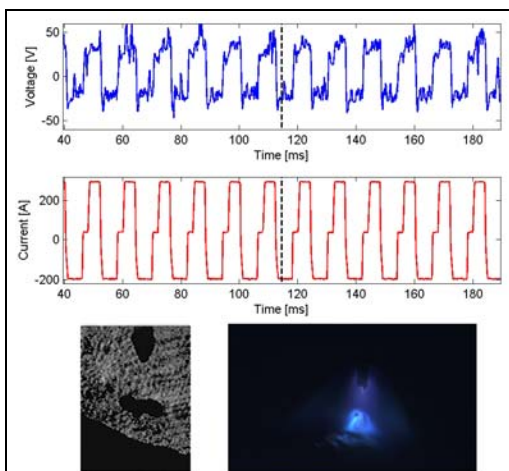


Figura 7 – Quadro de filmagem com onda C e 50%EN.

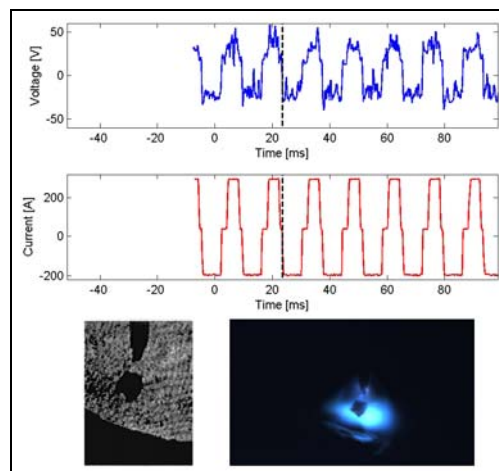


Figura 8 – Quadro de filmagem com onda D e 50%EN.

A transferência metálica nos formatos de onda B e C ocorre de maneira regular, sempre no positivo e bastante estável. No entanto, como pode ser observado na Figura 7 o destacamento na forma de onda C ocorre no final do pulso positivo e a gota atravessa o arco sofrendo ação das forças repulsivas que ocorrem na polaridade negativa, isto faz com que a gota sofra desaceleração, reduzindo a “quantidade de movimento”, e com isso seja transferida mais “suavemente” reduzindo a quantidade de respingos. Fato que não ocorre no formato de onda B, observado na Figura 6, onde a gota é transferida mais rapidamente para a poça de fusão e sempre durante o polo positivo, então, como a quantidade de movimento é maior, causa mais perturbação na poça de fusão e consequentemente mais respingos.

Finalmente, a Figura 8 representa o formato de onda 4 para 50%EN e nesta condição a transferência metálica é bem estável, já que a mudança de polaridade não é tão brusca, devido a base positiva antes e após o pulso de destacamento.

### 3.3. Resultados da Etapa 3: Avaliar a influência de Formas de Onda e %EN diferentes, sobre a Geometria e o Aspecto Superficial dos cordões.

A Tabela 7 apresenta os resultados das características geométricas dos cordões em função do tipo de onda e taxa de eletrodo negativo (%EN), além de mostrar essas variáveis codificadas para análise estatística, com o propósito de criar metamodelos matemáticos, através da ferramenta Matlab, que melhor representem essas variáveis.

Tabela 7 – Resultados características geométricas\*.

| Tipo de Onda |            | %EN   |            | P    | L     | R    |
|--------------|------------|-------|------------|------|-------|------|
| Tipo         | Codificada | Valor | Codificada |      |       |      |
| A            | 1          | 30    | -1         | 2.41 | 12.43 | 3.48 |
| A            | 1          | 50    | 0          | 1.58 | 12.56 | 3.56 |
| A            | 1          | 70    | 1          | 1.45 | 10.42 | 4.27 |
| B            | 2          | 30    | -1         | 2.76 | 12.07 | 4.3  |
| B            | 2          | 50    | 0          | 2.3  | 12.26 | 4.7  |
| B            | 2          | 70    | 1          | 1.82 | 11.2  | 4.9  |
| C            | 3          | 30    | -1         | 2.98 | 10.92 | 4.47 |
| C            | 3          | 50    | 0          | 2.45 | 10.28 | 4.88 |
| C            | 3          | 70    | 1          | 1.3  | 9.92  | 4.89 |
| D            | 4          | 30    | -1         | 3.8  | 10.5  | 4.9  |
| D            | 4          | 50    | 0          | 2.8  | 10.68 | 5.16 |
| D            | 4          | 70    | 1          | 1.9  | 10.05 | 4.63 |

\*P=penetração, L= largura e R=reforço, todos os valores em mm.

As Figuras 9, 10 e 11 apresentam os gráficos de penetração, largura e reforço respectivamente, em função do tipo de onda (A, B, C e D) e dos níveis de taxa de eletrodo negativo (%EN).

É possível perceber pela análise do gráfico da figura 9, que há uma clara tendência da penetração ser reduzida com o aumento do %EN para todos os quatro formatos de onda. Este fato ocorre por que o aumento do %EN representa um tempo maior na polaridade negativa e nesta condição o calor é mais concentrado no eletrodo, consequentemente o menor aporte térmico no metal de base representa menor penetração. Ueyama et al (2005) encontrou em seu estudo em alumínio que usando 40%EN o aporte térmico diminuiu e a temperatura de pico na chapa foi 140°C menor do que em DC pulsada.

O mesmo raciocínio é usado para explicar a tendência de redução da largura observada na figura 10, sobretudo para variação de 50 para 70%EN, pois o menor aporte térmico na chapa que ocorre com o aumento do %EN aquece menos a lateral da poça, dificultando o molhamento e fusão do metal de base.

Como há a dificuldade de molhamento, o material fundido tende a se concentrar na superfície da poça aumentando o reforço com o aumento do %EN, observado na Figura 11. Apenas para a onda D com 70%EN que fugiu a essa tendência, e experimentou um valor de reforço menor, este fato ocorreu devido à grande instabilidade gerada pelos altos valores de tempo na polaridade negativa que intensificou as forças repulsivas na gota, o que consequentemente, gerou perda de material por respingos.

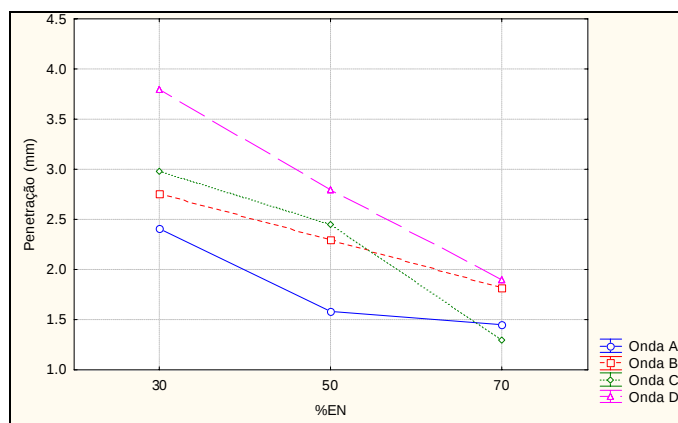


Figura 9 – Gráfico da penetração em função do tipo de onda e do %EN.

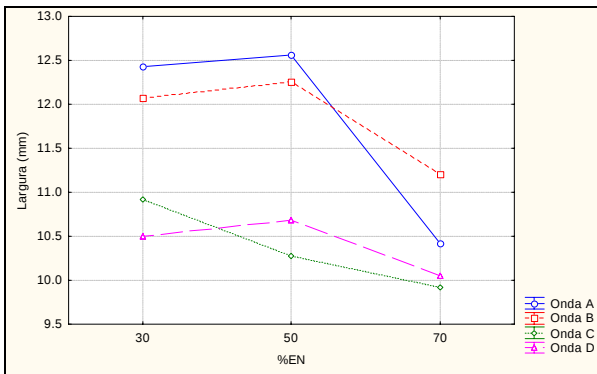


Figura 10 – Gráfico da largura em função do tipo de onda e do %EN.

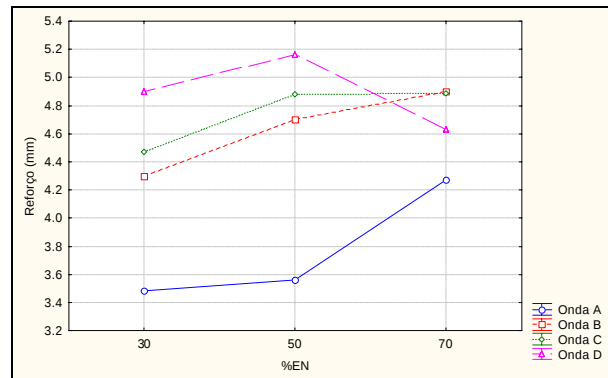


Figura 11 – Gráfico do reforço em função do tipo de onda e do %EN.

Foram criados modelos matemáticos com o auxílio do software Statistica e confirmados com o uso do Matlab que representassem o comportamento das características geométricas do cordão em função do formato de onda e da taxa de eletrodo negativo (%EN).

Dois modelos de aproximação foram testados no Matlab e representados pelas Equações 3 e 4:

$$y = A_0 + A_1 p_1 + A_2 p_2 \quad (3)$$

$$y = A_0 + A_1 p_1 + A_2 p_2 + A_3 p_1 p_2 \quad (4)$$

Onde:  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$  e  $A_3$  são constantes,  $p_1$  e  $p_2$  são os parâmetros de influência (tipo de onda e %EN respectivamente) e  $y$  a variável de resposta (penetração, largura ou reforço).

Os resultados obtidos com o Statistica foram apenas para o primeiro modelo de aproximação e foram idênticos aos encontrados através do Matlab.

O erro médio quadrático encontrado pelo segundo modelo de aproximação (Equação 4) que leva em consideração a interação dos fatores foi menor do que o do primeiro modelo (Equação 3) para todas as variáveis de resposta. Por isso, foi realizado um teste de hipótese comparando os dois modelos, e o melhor modelo para  $y$  é o da Equação 3, o mais simples, pois o erro médio quadrático referente à Equação 4 foi menor porque este estava modelando o erro do modelo e não o experimental.

As Equações 5, 6 e 7 representam respectivamente os modelos resultantes para penetração, largura e reforço em função do formato de onda e %EN. Lembrando que os níveis das variáveis foram codificados e estão apresentados na Tabela 7 acima.

$$P = 1,5433 + 0,3 \times ON - 0,685 \times EN \quad (5)$$

$$L = 12,52 - 0,565 \times ON - 0,541 \times EN \quad (6)$$

$$R = 3,6383 + 0,349 \times ON + 0,1925 \times EN \quad (7)$$

Onde: P=penetração, L=largura, R=reforço, ON= tipo de onda e EN= %EN.

#### 4. CONCLUSÕES

➔ O conhecimento da Equação da Taxa de Fusão nas polaridades positiva e negativa é fundamental para determinar parâmetros em MIG-PV que forneçam arco voltaico de comprimento constante e mais estável;

➔ A base positiva antes e após o pulso (onda D) é benéfica para evitar mudanças bruscas de polaridade, mas para %EN mais altas faz necessário tempos negativos longos que geram muita instabilidade;

➔ As ondas B e C fornecem arcos estáveis e com UGPP. No entanto, a base antes do pulso (onda C) é mais efetiva para evitar respingos;

➔ Há uma redução da penetração com o aumento do %EN devido à redução do aporte térmico, o que permite aplicação em soldagem de chapas finas ou em revestimentos;

➔ É possível selecionar a combinação de formato de onda e %EN mais adequado dependendo da aplicação, a partir das equações apresentadas para prever a geometria do cordão.

## 5. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela concessão de bolsa, ao IFM, à UFU. Aos companheiros discentes e professores do Laboratório para o Desenvolvimento de Processos de Soldagem – LAPROSOLDA pelo apoio a este trabalho.

## 6. REFERÊNCIAS

- Harwig, D. D., 2000, “Arc Behavior and Melting Rate in the VP-GMAW Process”. PhD Dissertation – Cranfield University, England, 221p.
- Mulligan, S. J., 2003, “Pulsed MIG Arc Welding Processes for Joining of Thin Sheet Aluminium”, TWI-771/2003.
- Norrish, J., 1992, “Advanced Welding Process”, Cranfield Institute of Technology, 375pg.
- Talkington, J. E., 1998. “Variable Polarity Gas Metal Arc Welding”, MSc Thesis - Ohio State University, USA.
- Ueyama, T; Tong, H; Harada, S; Passmore, R. e Ushio M., February 2005, “AC Pulsed GMAW Improves Sheet Metal Joining”. Welding Journal.

## MELTING RATE FOR PARAMETERS DETERMINATION IN MIG WELDING WITH VARIABLE POLARITY

### Alexandre Saldanha do Nascimento (Doutorando)

Universidade Federal de Uberlândia, Departamento de Engenharia Mecânica, Uberlândia, MG, Brasil  
asnascimento@mecanica.ufu.br

### Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho (Orientador)

Universidade Federal de Uberlândia, Departamento de Engenharia Mecânica, Uberlândia, MG, Brasil  
vilarinho@mecanica.ufu.br

**Abstract:** *The development of electronic power sources of welding has allowed the study of innovative processes, generally with the objective to improve the capacity of production allied the low levels of heat input. The existing processes are based on the way of metallic transference and the development of forms of waves that improve the control of the process. Process MIG-VP (Variable Polarity) Pulsed is a derivative process of the conventional MIG that joins the advantages of the use of positive polarity, as the good stability of arc and cathodic cleaning, with the supplied ones for the negative polarity, that would be mainly the high melting rate of the electrode and low heat input to the base metal. However, this process still possess use limited due to publication scarcity scientific and techniques. In such a way, in this work it is presented a proposal of a methodology for determination of parameters of welding in four different formats of wave and varying the ratio of negative electrode in three levels, in order to supply stability of arc and metallic transference, the evaluation of the process was carried through filmings of the arc and analysis of the geometric characteristics of the bead. The method if disclosed sufficiently efficient with satisfactory results of stability.*

**Keywords:** *Alternating Current. Pulsed. Negative Electrode.*