

AVALIAÇÃO DAS EFICIÊNCIAS DE DEPOSIÇÃO E TÉRMICA NA SOLDAGEM MAG COM ARCO PULSADO

Yukio Kobayashi

Gilberto de Magalhães Bento Gonçalves

Wallace Gusmão Ferreira

Universidade Estadual Paulista, Laboratório de Soldagem, Departamento de Engenharia Mecânica, 17033-360, Bauru, SP, Brasil. E-mail: kio@bauru.unesp.br

Resumo

A partir da variação das velocidades de soldagem e alimentação do eletrodo as eficiências térmica e de deposição foram avaliadas mantendo-se constante o aporte de calor e a área do reforço do cordão de solda. Ainda, em ambas as situações também foram variados individualmente os parâmetros de pulsação do arco (I_p , F , e t_p) e, por conseguinte, verificado seus efeitos sobre as referidas eficiências. Constatou-se que a eficiência térmica apresentou, em média, valores maiores que a eficiência de deposição. Concluiu-se que, para o controle da eficiência de deposição, é indiferente a manutenção da área do reforço ou do aporte térmico constantes. Para o controle da eficiência térmica, é necessária uma análise individualizada da influência dos parâmetros de pulsação de arco. Tecnicamente, a manutenção da área do reforço constante apresentou-se como uma melhor opção devido à sua menor complexidade teórica.

Palavras-chave: Soldagem MAG, Arco pulsado, Eficiências térmica e de deposição

1. INTRODUÇÃO

Entre os processos de soldagem a arco elétrico com proteção gasosa exterior, genericamente designados como MIG - MAG (*metal inert gas – metal active gas*), a utilização do arame tubular como consumível apresenta uma tendência mundial de crescimento, despertado principalmente pela excelente produtividade que pode ser alcançada, aliada a inerente simplicidade na adaptação para operações automatizadas. Se utilizado com arco pulsado essa expectativa deve aumentar ainda mais, pois os níveis de corrente de soldagem média usadas para se obter iguais taxas de deposição em corrente convencional são bem menos elevados. Enfim, todas essas asserções e diversas outras características são facilmente constatadas no trabalho de Norrish et al. (1989) e, mais recentemente, no artigo de Svensson e Elvander (1999).

Entretanto, é importante considerar que a soldagem com arame tubular em arco pulsado introduz uma gama enorme de variáveis operacionais a serem especificadas, o que tem conduzido a realização de inúmeras pesquisas voltadas ao relacionamento sinérgico entre elas, bem como aquelas tradicionais no âmbito da metalurgia da soldagem.

Este trabalho tem como propósito avaliar os efeitos da variação das condições de soldagem nas eficiências de deposição e térmica do processo arame tubular com pulsação de arco, porém mantendo-se constante numa situação a entrada de massa, aqui associada com a área do reforço da solda, e na outra a energia dissipada para o metal de base durante a soldagem ou, simplesmente, o aporte de calor.

A importância dessa avaliação pode ser justificada em dois aspectos: o primeiro deles refere-se a idéia da adequação das condições de soldagem objetivando variar independentemente a entrada de massa e energia de soldagem. Conforme mostraram Smartt e Einerson (1993), isto só é possível sob condições de soldagem específicas e, em termos

metalúrgicos, permite o controle da integridade mecânica da junta, pois a entrada de massa e o aporte de calor estão intimamente relacionados com o ciclo térmico que atua em toda a região soldada. O segundo aspecto mencionado trata-se do fato de que a relação causa - efeito incutido na parte experimental está atrelada à determinação de rendimentos ou eficiências, o que em engenharia sempre constitui-se numa informação básica na tomada de uma decisão técnico - econômica.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A partir da ilustração contida na figura 1, verifica-se que variações nas velocidades de soldagem V_s [mm/s] e de alimentação do eletrodo V_e [mm/s] acarretam alterações nos valores da área do reforço do cordão de solda G [mm²] e aporte de calor H [J/mm]; porém, ajustes independentes nos valores dessas grandezas só são possíveis se for mantida uma razão constante entre os valores das referidas velocidades.

Uma visualização simples do que foi dito pode ser feita da seguinte forma: tomando-se por referência uma das retas que representam (G) constante na figura 1, por exemplo (G_1) , nota-se que indo da condição assinalada como (1) até a condição (2), haverá uma mudança no valor do aporte de calor de (H_1) para (H_2) com, obviamente, (G_1) permanecendo constante. O mesmo raciocínio deve ser levado em conta quando (H) for considerado constante.

O relacionamento matemático entre (G) , (H) , (V_s) e (V_e) , em circunstâncias reais, pode ser feito pelas equações:

$$G = \eta_d \frac{V_e A_e}{V_s} \quad (1)$$

e

$$H = \eta_t \frac{UI}{V_s} \quad (2)$$

onde η_d é a eficiência de deposição e η_t é a eficiência térmica, A_e [mm²] é a área da secção transversal do eletrodo, e tanto I [A] quanto U [V] representando nessa ordem a corrente e a tensão de soldagem.

Faz-se a ressalva de que na soldagem com arco pulsado tem sido aceito a substituição da (I) e (U) na equação (2) pelo valor eficaz dessas variáveis, designado como (I_{ef}) e (U_{ef}) . Além disso, observa-se que a não consideração das eficiências nas equações (1) e (2) resulta na determinação da área teórica do reforço do cordão de solda (G_{teor}) e da energia total disponível para a soldagem (H_{teor}) .

No que concerne ao significado das eficiências avaliadas, a de deposição, (η_d) , de acordo com Widgery (1986) indica a razão entre a massa do eletrodo efetivamente depositada (M_{ed}) e a massa do eletrodo teoricamente consumida (M_{ec}) , ou seja:

$$\eta_d = \frac{M_{ed}}{M_{ec}} \quad (3)$$

A eficiência térmica (η_t) , como é sabido, expressa a razão entre o aporte de calor (H) e a energia total disponível para a soldagem (H_{teor}) , segundo a relação:

$$\eta_t = \frac{H}{H_{teor}} \quad (4)$$

com:

$$H_{teor} = \frac{U_{ef} I_{ef}}{V_s} \quad (5)$$

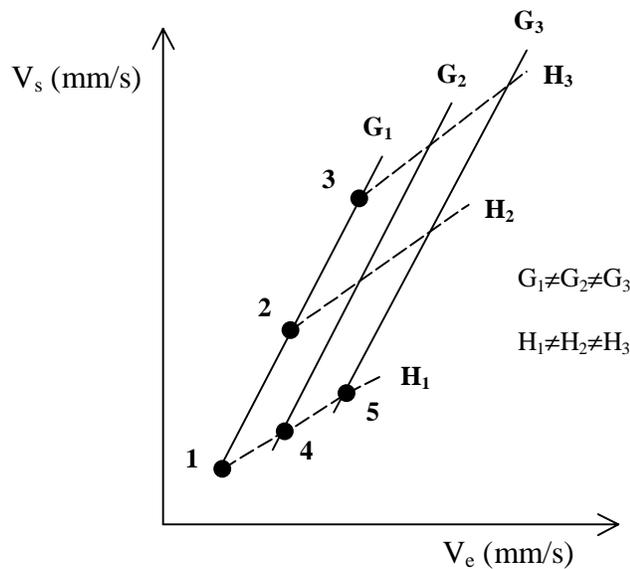


Figura 1. Relação linear e ideal entre (V_s) e (V_e) para as situações em que (G) e (H) permanecem constantes, com base nas equações (1) e (2)

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Realização das soldas

As condições de soldagem utilizadas estão mostradas na tabela 1. Os valores I_{ef} , U_{ef} , V_s e V_e , são médios e relativos a três repetições em cada procedimento de soldagem. As variações em (V_s) e (V_e), idealmente representariam na figura 1 as coordenadas dos pontos (2) e (3) para a situação em que (G_1) permanece inalterado e, da mesma maneira, (4) e (5) para (H_1) constante, com o ponto (1) comum as duas situações. A tabela 1 mostra também que as variações em (V_s) e (V_e) foram combinadas com alterações individuais dos parâmetros característicos da onda pulsada (corrente de pico, I_p , frequência, F, e tempo do pulso, t_p).

Tabela 1. Condições de soldagem adotadas

Soldas	$I_{ef(méd)}$ (A)	$U_{ef(méd)}$ (V)	$V_{s(méd)}$ (mm/s)	$V_{e(méd)}$ (mm/s)	I_p (A)	F (Hz)	t_p (ms)
1-(inicial)	242	23,3	3,7	127	350	120	2,5
2-(G/ $I_p/t_p=cte$)	290	25,0	4,0	170	350	180	2,5
3-(G/ $I_p/t_p=cte$)	300	26,7	4,5	190	350	240	2,5
4-(H/ $I_p/t_p=cte$)	294	26,5	4,0	212	350	180	2,5
5-(H/ $I_p/t_p=cte$)	310	29,0	4,5	253	350	240	2,5
2-(G/ $I_p/F=cte$)	247	26,5	4,0	170	350	120	3,0
3-(G/ $I_p/F=cte$)	256	26,3	4,5	190	350	120	3,5
4-(H/ $I_p/F=cte$)	283	26,1	4,0	212	350	120	3,0
5-(H/ $I_p/F=cte$)	299	26,6	4,5	253	350	120	3,5
2-(G/ $F/t_p=cte$)	258	25,9	4,0	170	400	120	2,5
3-(G/ $F/t_p=cte$)	266	25,8	4,5	190	450	120	2,5
4-(H/ $F/t_p=cte$)	294	26,3	4,0	212	400	120	2,5
5-(H/ $F/t_p=cte$)	323	26,3	4,5	253	450	120	2,5

As soldas foram executadas na posição plana em simples deposição sobre tiras de aço estrutural de baixo carbono com as dimensões de 180 x 100 x 6,35 mm. Os consumíveis usados foram o CO₂ como gás de proteção e o eletrodo com especificação AWS (*American Welding Society*) E71T-1, diâmetro nominal de 1,2 mm. O equipamento básico utilizado para a soldagem foi uma fonte de energia do tipo inversora, microprocessada, com o avanço da tocha sendo feito mecanicamente através da adaptação do dispositivo de translação de uma máquina de corte oxi-acetilênico portátil. Em todas as soldas procurou-se manter constante a corrente de base, I_b, da onda pulsada em 60 A, a vazão do CO₂ em 330 cm³/s e 15 mm como a extensão do eletrodo.

O comportamento dos parâmetros (I_b), (I_p), (F) e (t_p) foi monitorado e registrado através da utilização de um sistema de aquisição de dados computadorizado, fornecendo os valores de (I_{ef}) e (U_{ef}). Sobre as velocidades (V_s) e (V_e), os valores relativos a (V_e) foram lidos diretamente do equipamento de solda e os valores de (V_s) foram obtidos a partir da cronometragem das soldas.

3.2 Medidas das eficiências

Para o cálculo da eficiência de deposição (η_d), a quantidade (M_{ed}) foi determinada pela diferença entre a massa da tira antes e depois da realização de cada solda, ao passo que (M_{ec}) pôde ser obtido através da seguinte expressão:

$$M_{ec} = \frac{V_e}{V_s} (L) \rho_{(l)} \quad (6)$$

com as variáveis novas que aparecem sendo L[mm] o comprimento do cordão de solda e (ρ_(l)) a massa específica linear do eletrodo usada é igual a 7,58 x 10⁻³ g/mm.

No caso da eficiência térmica (η_t), verifica-se prontamente que a maior dificuldade reside na determinação do aporte de calor (H). Uma alternativa viável experimentalmente foi aplicar o método desenvolvido por Niles e Jackson (1975) e que consiste em fazer essa determinação resolvendo, para valores particulares de temperaturas, a clássica equação de Rosenthal para o fluxo de calor na soldagem.

Especificamente sobre a equação de Rosenthal apresentada abaixo, é interessante reconhecer que ela trata da dissipação do calor em regime permanente numa placa metálica de dimensões semi-infinita e introduzido por uma fonte de energia pontual que se desloca na superfície da placa.

$$T - T_0 = \left(\frac{P_d}{2\pi kr} \right) e^{-\frac{V_s}{2\alpha}(x-r)} \quad (7)$$

Excluindo (V_s) que já teve seu significado mencionado antes, as outras variáveis da equação (7) são: T[°C] a temperatura de um ponto de coordenadas x, y e z[mm] em relação a fonte de energia, T₀[°C] a temperatura inicial desse ponto e P_d[W] a potência disponível também no referido ponto. As propriedades térmicas do material das tiras, isto é, a condutividade (k) e a difusividade (α), são admitidas como constantes e no caso do aço usado, normalmente assumem os valores de 43 x 10⁻³ W/mm°C e 9 mm²/s, respectivamente. A distância (r) da fonte de energia em relação ao ponto de coordenadas (x;y;z) é calculada por:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (8)$$

Quanto a determinação feita com a equação (7), uma vez que a temperatura máxima experimentada em pontos situados na superfície das tiras, portanto apenas com coordenadas x e y como melhor ilustra a figura 2, pôde ser obtida empiricamente por meio da medida do ciclo térmico imposto durante a soldagem, foi estimada a potência associada a esse valor e,

em seguida, convertida em energia por unidade de comprimento, ou equivalentemente o aporte de calor em (J/mm), através do imediato acerto dimensional:

$$H = \frac{P_d}{V_s} \quad (9)$$

sendo P_d [W] e V_s [mm/s].

Na medida do ciclo térmico foram utilizados um termopar do tipo K (cromel-alumel) interligado a um sistema de aquisição de dados exclusivamente confeccionado para gerar, via computador, o diagrama temperatura em função do tempo e fornecer os valores da temperatura máxima e do tempo decorrido para atingi-la. Acrescenta-se que a fixação do termopar na superfície das tiras foi parafusada; união essa possível devido a ponta do sensor ser no formato de uma arruela. A título de ilustração, a figura 3 mostra um dos registros dos ciclos térmicos medidos.

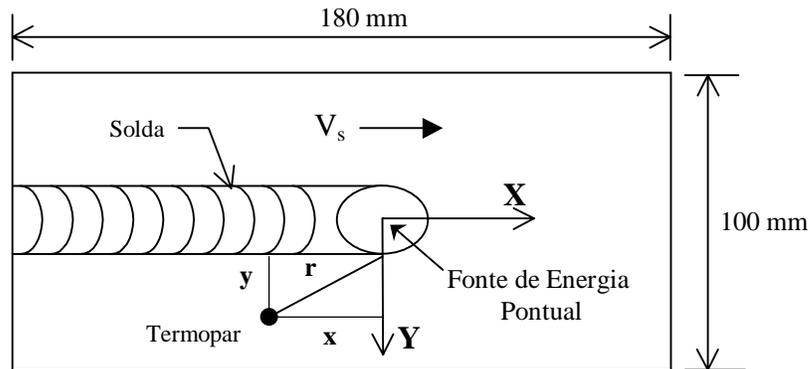


Figura 2. Posicionamento do termopar

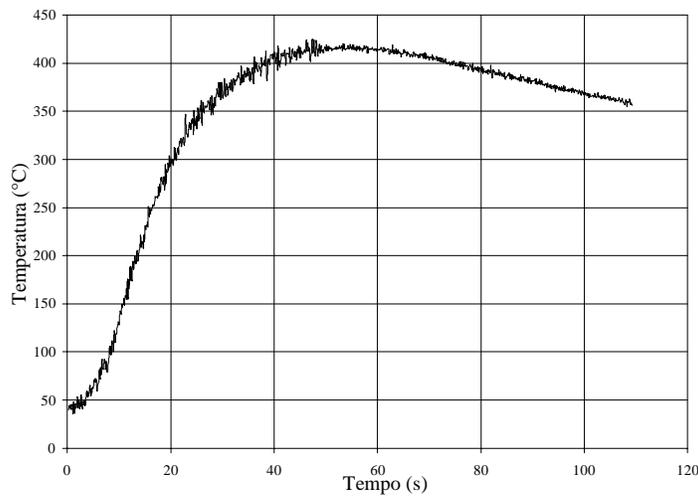


Figura 3. Diagrama da temperatura em função do tempo para uma das três soldas (5)-H/I_p/F realizadas, atingindo a temperatura máxima de 416 °C num ponto de coordenadas (147 mm ; 9 mm) da fonte em relação ao termopar

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 2 apresenta uma síntese dos resultados obtidos em termos dos valores médios relativos a três repetições em cada procedimento de soldagem. A figura 4 exibe o comportamento dos valores médios das eficiências (η_d) e (η_t), contidos na tabela 2, em função das alterações em (F), (t_p) e (I_p).

Tabela 2. Valores médios da área do reforço das soldas, aporte de calor e das eficiências de deposição e térmica

Solda	$G_{(méd)}$ (mm^2)	$H_{(méd)}$ (J/mm)	$\eta_{d(méd)}$ (%)	$\eta_{t(méd)}$ (%)
1-(inicial)	27,9	1294,5	84,5	85,0
2-($G/I_p/t_p=cte$)	34,5	1596,3	85,8	85,7
3-($G/I_p/t_p=cte$)	34,9	1662,3	84,5	92,3
4-($H/I_p/t_p=cte$)	41,6	1646,8	80,8	84,0
5-($H/I_p/t_p=cte$)	47,1	1751,5	86,3	87,0
2-($G/I_p/F=cte$)	34,8	1535,1	83,7	92,0
3-($G/I_p/F=cte$)	33,9	1311,9	81,2	86,0
4-($H/I_p/F=cte$)	43,0	1742,7	83,4	94,0
5-($H/I_p/F=cte$)	44,2	1591,9	80,9	89,0
2-($G/F/t_p=cte$)	33,3	1360,6	80,0	80,0
3-($G/F/t_p=cte$)	32,5	1295,6	79,2	84,0
4-($H/F/t_p=cte$)	35,6	1580,4	69,6	82,0
5-($H/F/t_p=cte$)	41,1	1606,0	75,9	85,0

Os valores de (G) em cada solda foram determinados pela aproximação:

$$G = \frac{M_{ed}}{(\rho)(L)} \quad (10)$$

sendo (ρ) a massa específica do aço ($7,8 \text{ g/cm}^3$).

A especulação imediata a ser feita com os dados mostrados na tabela 2 refere-se a simples comparação entre os valores médios de (η_d) e (η_t). Em assim procedendo, constata-se que na quase totalidade a eficiência (η_d) é menor que a eficiência (η_t). Devido a falta de uma correlação direta entre essas eficiências, uma possível explicação para este comportamento restringe-se à parte operacional, ou mais especificamente, no uso do CO_2 como proteção gasosa.

A esse respeito, já é bastante conhecido que, apesar da incidência acentuada de “salpico” ou, tecnicamente, a perda de material na transferência do metal de adição do eletrodo para o metal de base, esse tipo de proteção gasosa gera também um excelente insumo de calor, em razão da exotermia na decomposição da molécula do CO_2 no arco elétrico. Evidentemente que isto significa uma diminuição na eficiência (η_d) e aumento na eficiência (η_t). Ainda assim, nos processos convencionais o grau dessas ocorrências tem sido relacionado de forma diretamente proporcional com o nível da intensidade da corrente de soldagem usada, que no caso do arco pulsado deve ser pensado em termos da corrente eficaz (I_{ef}).

Uma confirmação experimental posterior, de ordem metalúrgica, sobre as considerações feitas acima e que poderia ser realizada, consiste em se determinar a relação entre a área do reforço da solda e área total do cordão de solda, juntamente com a estimativa da diferença de concentração dos elementos químicos medidas por análise química e pelo cálculo da diluição do metal de base.

Enquanto os resultados apresentados nessa última tabela sustentaram uma análise de caráter geral a respeito do comportamento das eficiências, as curvas apresentadas na figura 4, por sua vez, permitem fazer a particularização para as variações nos parâmetros (F), (t_p) e (I_p) realizadas.

Desta forma, por exemplo, se em um procedimento de soldagem semelhante ao estudado a preocupação for apenas com a eficiência (η_d), a questão de manter (G) ou (H) constante torna-se indiferente e a otimização mais provável para essas eficiência ocorreria com os valores 120 Hz, 2,5 ms e 350 A para (F), (t_p) e (I_p), respectivamente. Como pode ser visto na tabela 1 a velocidade (V_c) teria o valor de 127 mm/s e 3,7 mm/s seria o valor para (V_s). Pelo contrário, se o objetivo for a eficiência (η_t) deve ser considerado cada caso, como segue: para (F) a manutenção de (G) constante seria mais interessante (fig. 4a), para (t_p) prevalece (H) constante (fig. 4b) e, por fim, com (I_p), novamente, há uma clara equivalência em manter (G) ou (H) constantes (fig. 4c). Os valores dos parâmetros do pulso nesse caso, evidentemente, correspondem aos valores máximos da eficiência (η_t) para as três avaliações efetuadas.

É importante acrescentar que independente da situação em que se mantém (G) ou (H) e as possíveis implicações nas eficiências (η_d) e (η_t), para o procedimento de soldagem adotado, a manutenção de (G) constante mostrou-se uma alternativa mais viável tecnicamente, devido à instrumentação e o controle serem mais simples, além do número de variáveis interferentes serem menores.

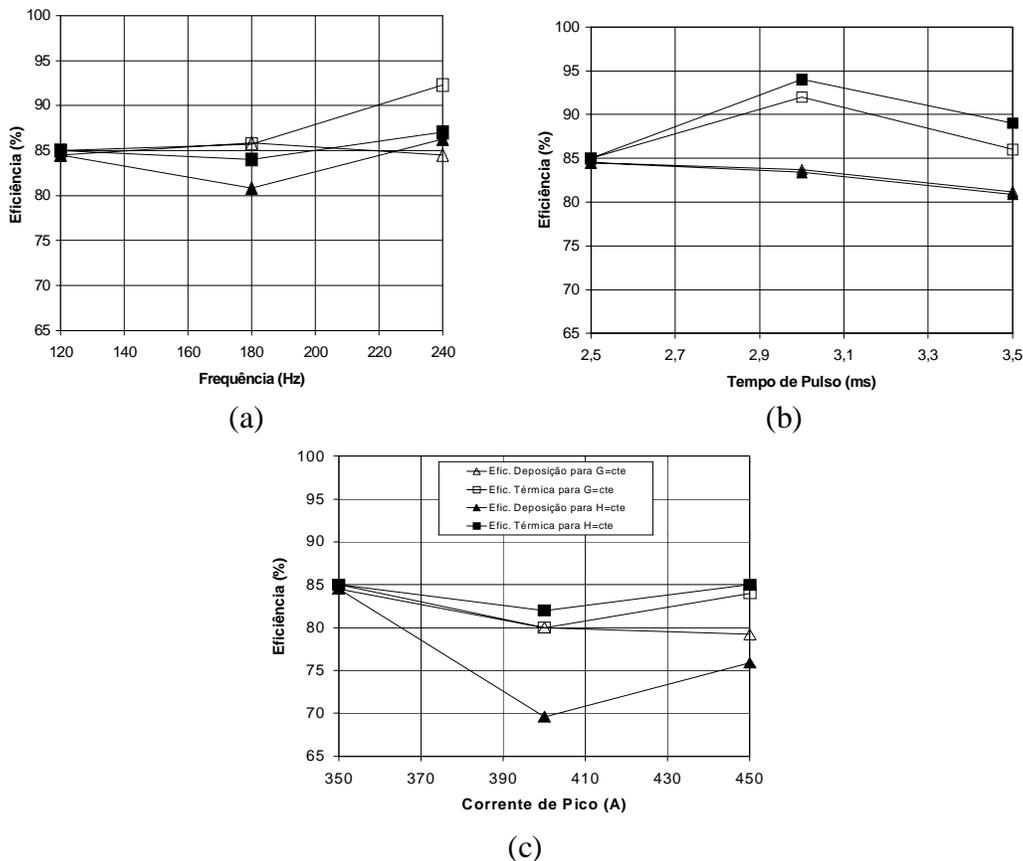


Figura 4. Comportamento das eficiências de deposição e térmica em função das alterações na frequência (a), no tempo de pulso (b) e na corrente de pico (c)

4. CONCLUSÕES

Para as condições analisadas, a eficiência (η_t) apresentou, de maneira geral, valores médios mais elevados do que a eficiência (η_d);

Se o objetivo do processo for o controle da eficiência (η_d), é indiferente a manutenção da área do reforço (G) ou do aporte térmico (H) constantes;

Em contrapartida, se objetivo do processo for o controle da eficiência (η_t), é necessária uma análise individualizada da influência dos parâmetros de pulsação de arco;

Tecnicamente a manutenção da área do reforço (G) constante apresentou-se mais viável devido à sua menor complexidade teórica.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP (Fundação de Amparo à pesquisa do Estado São Paulo) pela concessão do fomento destinado a esse trabalho (Proc. 98/01123-7), a ESAB e White Martins pela doação dos consumíveis, e ao auxílio do Sr. Hamilton José de Mello, servidor técnico lotado no Laboratório de Soldagem da UNESP-FE-DEM – Campus de Bauru.

6. REFERÊNCIAS

- Niles, R. W. and Jackson, C. E. , 1975, “Weld Thermal Efficiency of the GTAW Process”, *Welding Journal*, v.54, n.1, January, pp.25s-32s.
- Norrish, J. and Nixon, J. , 1989, “A History of Pulsed MIG Welding”, *Joining and Materials*, June, pp. 264-268.
- Smartt, H. B. and Einerson, C. J. , 1993, “A Model for Heat and Mass Input Control in GMAW”, *Welding Journal*, May, pp.217s-229s.
- Svensson, L-E. and Elvander, J. , 1999, “Challenges for Welding Consumables for the New Millennium”, *Svetsaren*, v.54, n.1-2, pp.3-11.
- Widgery, D. , 1986, “Welding – The Key to Better productivity”, *Welding and Metal Fabrication*, March, pp.58-59.