

## Um Estudo da Eficiência Térmica dos Principais Processos de Soldagem a Arco

### (A Study of Thermal Efficiency of the Principal Arc Welding Processes)

Mateus Barancelli Schwedersky<sup>1</sup>, Jair Carlos Dutra<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

<sup>1</sup>[barancelli@emc.ufsc.br](mailto:barancelli@emc.ufsc.br); <sup>2</sup>[jdutra@emc.ufsc.br](mailto:jdutra@emc.ufsc.br)

#### RESUMO

Em muitos trabalhos da área de soldagem são utilizados coeficientes relativos à eficiência térmica dos processos de soldagem a arco. Esses índices, denominados por eficiência do arco e eficiência de fusão, são amplamente utilizados para o cálculo da energia imposta, principalmente nos trabalhos de metalurgia da soldagem. Nesse contexto, o presente trabalho realizou uma análise das publicações encontradas na literatura no tocante ao significado desses termos que são inerentes à eficiência de transferência de calor, mostrando os resultados encontrados nas publicações de diferentes autores para os processos MIG/MAG, TIG e Plasma. Foram realizados também ensaios de soldagem tipo cordão sobre chapa para verificar a influência da variação da distância eletrodo-peça na eficiência de fusão do processo TIG para soldagem de aço. O principal problema apontado com relação a esse tipo de análise é que não existe um valor único dos coeficientes para cada processo, fato que não é considerado por muitos profissionais da área de soldagem. Para os processos com eletrodos não consumíveis, a eficiência térmica varia de forma acentuada conforme os parâmetros usados, podendo apresentar valores baixos, ou valores tão elevado quanto os processos como o MIG/MAG.

**Palavras-chave:** Eficiência do arco; Eficiência de fusão; TIG; Plasma; MIG/MAG.

#### ABSTRACT

In many works from the welding area coefficients are used for the thermal efficiency of arc welding processes. These coefficients, known as arc efficiency and melting efficiency, are widely used for the calculation of heat input, especially in works of welding metallurgy area. In this context, the present work made an analysis of publications in the literature regarding the meaning of those terms that are inherent to the heat efficiency transfer, showing the results were found in publications of different authors for the MIG/MAG, TIG and Plasma processes. Also, bead on plate welding tests were carried out to check the influence of the electrode-workpiece distance on the melting efficiency of TIG process for steel welding. The main problem encountered with this type of analysis is that there is not a unique value of the coefficients for each process, a fact that is not considered by many professionals in the welding area. For processes with non-consumable electrodes, the thermal efficiency varies dramatically according to the used parameters, and may present really low values, or values as high as processes such as MIG/MAG.

**Keywords:** Arc efficiency; Melting efficiency; TIG; Plasma; MIG/MAG

#### 1 – Introdução e Objetivos

Apesar das publicações brasileiras e internacionais possuírem uma quantidade apreciável de informações específicas para cada processo, quando se trata de proporcionar informações comparativas entre os diferentes processos, essas informações são escassas, ou feitas sob pontos de vista limitados a determinadas condições experimentais. Dessa forma, as informações que são encontradas não possuem grande valor prático para o setor industrial, ou em muitas vezes podem até fazer um desserviço, pois não são corretamente interpretadas pelos profissionais da área.

Tendo em vista essa falta de informação, o presente trabalho se propõe a esclarecer alguns pontos considerados importantes sobre a produtividade de diferentes processos de soldagem a arco por meio dos resultados práticos de desenvolvimentos realizados nos últimos anos dentro do LABSOLDA-UFSC, relacionado-os com as informações da literatura. Dessa forma, o trabalho pretende expor alguns pontos fundamentais para o debate da produtividade dos principais processos de soldagem a arco, considerando também os aspectos do ponto de vista prático.

## 2 – Análise da Eficiência Térmica dos Processos de Soldagem a Arco

### 2.1 - Introdução aos conceitos básicos de eficiência térmica dos processos

É importante definir claramente o significado dos termos relativos à eficiência térmica que serão usados ao longo do texto, pois existe variação na denominação adotada por cada autor. Os dois principais termos usados para análise de eficiência térmica dos processos de soldagem são: Eficiência do Arco (que muitas vezes também é conhecido como Rendimento Térmico) e Eficiência de Fusão.

O valor da eficiência do arco, representado pelo símbolo  $\eta_a$  pode ser obtido pela Equação 1:

$$\eta_a = \frac{E_{cal}}{\frac{\sum_{i=1}^n I_i \times U_i}{n} t} \quad \text{(Equação 1)}$$

Sendo:  $E_{cal}$ , a quantidade de energia obtida da medição com um calorímetro;  $\frac{\sum_{i=1}^n I_i \times U_i}{n}$ , a média da potência elétrica calculada por meio do produto da corrente e da tensão do arco nos diferentes instantes;  $t$ , o tempo de soldagem.

O resultado da medição com calorímetro representa a soma de toda a energia que foi transferida para a peça, incluindo a energia térmica que foi usada para produzir a área fundida, bem como a energia que não resultou em fusão e foi transferida por condução térmica e convecção ao longo do corpo de prova. Quanto menor o valor de  $\eta_a$ , maior é a perda energética total do processo, sendo que as principais fontes de perda são evaporação de material metálico, radiação luminosa, condução e convecção para o ambiente e partes da tocha de soldagem.

O valor da eficiência de fusão, representado pelo símbolo  $\eta_m$ , pode ser obtido com a Equação 2:

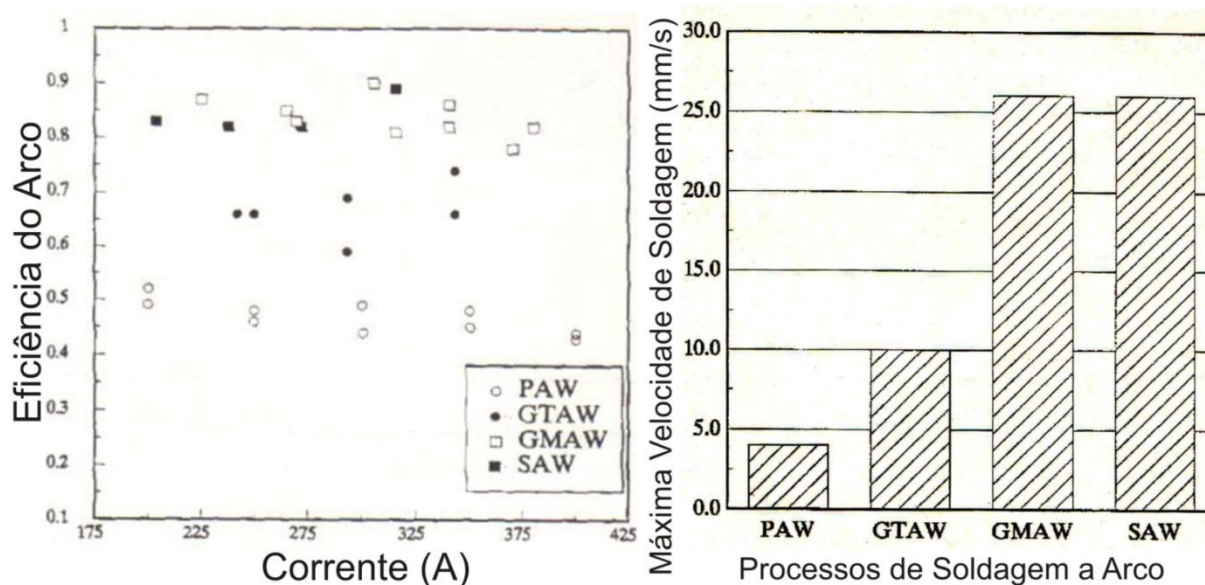
$$\eta_m = \frac{Q A_m v}{\frac{\sum_{i=1}^n I_i \times U_i}{n}} \quad \text{(Equação 2)}$$

Sendo:  $Q$ , a entalpia de fusão, em J/mm<sup>3</sup> (Quantidade de energia requerida para elevar a temperatura do metal sólido até a temperatura de fusão e para converter esse volume do estado sólido para o estado líquido);  $A_m$ , a área fundida medida na seção transversal em mm<sup>2</sup>;  $v$ , a velocidade de soldagem em mm/s;  $\frac{\sum_{i=1}^n I_i \times U_i}{n}$ , a média da potência elétrica calculada por meio do produto da corrente e da tensão do arco nos diferentes instantes. No presente trabalho foram realizados cálculos de  $\eta_m$  com os dados de diferentes situações de cordões soldados. Em todos os casos, a entalpia de fusão do aço carbono foi considerada 10,5 J/mm<sup>3</sup>, valor retirado de [1].

Podem-se encontrar nos trabalhos científicos e publicações equações aparentemente diferentes para calcular o valor da  $\eta_m$ , sendo que cada autor usa diferentes denominações, mas o significado prático na maioria das vezes é o mesmo. A principal diferença encontrada é que alguns autores incluem o  $\eta_a$  (valor da eficiência do arco) no cálculo da  $\eta_m$ . Como foi mostrado na Equação 2, o presente trabalho usará método de cálculo da eficiência de fusão, o qual não considera o valor de  $\eta_a$ . Para os processos que utilizam material de adição, existem ainda casos onde os autores calculam a eficiência de fusão de maneira separada para o eletrodo e para a peça, sendo o valor de  $\eta_m$  calculado usando as respectivas áreas.

### 2.2 - Discussão sobre os aspectos encontrados na literatura sobre eficiência térmica dos processos de soldagem a arco

Analisando as publicações e trabalhos científicos da área de soldagem, é possível afirmar que existe muito material didático e técnico sobre cada processo de soldagem de maneira isolada, porém, quando se trata de comparações entre os diferentes processos (e também variantes tecnológicas de cada processo), esse material é superficial e extremamente acadêmico. Nota-se também que, grande parte das publicações, como livros, artigos científicos, dissertações e teses transcrevem sempre as mesmas informações que são mostradas na literatura sobre esse assunto. Nesse contexto, podemos citar o livro da AWS, que mostra comparações dos diferentes processos sugerindo que o desempenho estaria associado à eficiência do arco. Esses resultados estão mostrados na Figura 1, e foram originados no trabalho de DuPont e Marder [2].



**Figura 1 - Gráfico da eficiência do arco segundo DuPont e Marder [2], publicado também no Welding Handbook da AWS [1]. (esquerda) Velocidade de soldagem máxima dos processos de soldagem a arco, segundo DuPont e Marder [2]. (direita)**

Com base nesses resultados, os autores afirmam que cada processo apresenta valores de  $\eta_a$  definidos, sem variação significativa dos valores, independente da corrente de soldagem. O processo PAW apresentou o menor valor  $0,47 \pm 0,03$ , o processo TIG apresentou  $0,67 \pm 0,05$  e os processos MIG/MAG e SAW apresentaram cerca de  $0,84 \pm 0,04$ . É possível notar que os processos com eletrodo consumível apresentaram eficiência maior do que os processos com eletrodos não consumíveis. A justificativa dada por DuPont e Marder [2] para a diferença nos valores de  $\eta_a$ , seria que nos processos MIG/MAG e SAW o calor gerado pelo aquecimento resistivo do arame eletrodo é transferido para a peça, enquanto nos processos TIG e Plasma essa energia é perdida para o eletrodo e tocha de soldagem. Para apoiar essa afirmação, os autores mostram cálculos com equações teóricas nas quais o aquecimento resistivo do arame eletrodo representa cerca de 14-18% da potência total da soldagem nos processos MIG/MAG e SAW, e destacam que esse percentual calculado é equivalente à diferença entre os valores de  $\eta_a$  dos processos MIG/MAG e TIG que foram obtidos nas medições com resultados mostradas na Figura 1 (esquerda). O pior desempenho do PAW em relação ao TIG seria devido ao fato de que, além da perda com o eletrodo, parte da energia é também transferida para o bocal de restrição ao invés de ir para a peça.

Segundo DuPont e Marder [2], a eficiência de fusão está ligada diretamente à eficiência do arco, de modo que um valor baixo de  $\eta_a$  seria um fator limitante para o valor de  $\eta_m$ , e que a velocidade de soldagem do processo seria limitada devido a baixa eficiência do arco. Com base nessas afirmações, e considerando também que cada processo supostamente possui uma faixa de valores de  $\eta_a$  bem definida, DuPont e Marder [2] classificam os processos TIG e Plasma como processos de soldagem obrigatoriamente lentos, conforme está mostrado no gráfico da Figura 1 (direita).

De maneira geral, os resultados e conclusões de DuPont e Marder, que também estão mostrados no Welding Handbook da AWS, estão bastante difundidos nos livros e apostilas usadas no ensino de processos de soldagem no Brasil, e também nos trabalhos acadêmicos. O presente trabalho expressa críticas para alguns pontos principais que são informações amplamente propagadas, como por exemplo as concepções de que: Cada processo de soldagem possui valores de eficiência do arco bem definidos; A diferença entre os valores do rendimento do arco de processos como MIG/MAG e TIG é decorrente simplesmente da energia perdida por aquecimento do eletrodo não consumível; Os processos possuem faixas de valores de velocidade de soldagem, sendo que o TIG e Plasma apresentam obrigatoriamente pior desempenho.

Logicamente, não se coloca dúvida sobre os resultados das medições de DuPont e Marder [2]. Ao longo dos próximos itens, são mostradas comprovações de que a eficiência do arco varia de maneira acentuada nos processos TIG e Plasma, e também pode variar para os processos MIG/MAG ou SAW. Ou seja, não existem faixas fixas e definidas. O trabalho de DuPont e Marder [2] e o livro da AWS [1], (e por consequência todo o material técnico e didático que é elaborado com base nessas referências), não mencionam as variações e diferenças entre os processos, e acaba induzindo o leitor a conclusões erradas.

No caso dos experimentos de DuPont e Marder [2], os autores usaram distância eletrodo-peça de 6 mm e Argônio puro no gás de proteção em todos os testes para o processo TIG, ou seja, uma condição onde o processo TIG não apresenta o melhor desempenho. No trabalho de Fuerschbach e Knorovsky [3], foram realizadas medições da eficiência do arco para o processo TIG e Plasma, no caso do TIG foram realizados com DEP de 1,0 mm e Argônio puro no gás de proteção. Comparando-se os resultados de eficiência do arco obtidos pelos diferentes autores, os resultados de Fuerschbach e Knorovsky [3] mostram valores muito mais elevados do que DuPont e Marder [2], sendo o valor de  $\eta_a$  aproximadamente 0,8 para o TIG e aproximadamente 0,6 para o Plasma. Outro exemplo de resultados de eficiência de arco para o processo TIG pode ser encontrado no trabalho de Collings et al [4], o qual relata valores medidos de  $\eta_a$  entre 0,77-0,90 para o processo TIG com testes tipo cordão em chapa usando elevadas velocidades, na faixa entre 100-400 mm/s. No trabalho de Kusch et al [5] os autores encontraram  $\eta_a$  de 0,76 para o processo TIG usando Argônio e DEP de 4 mm, e  $\eta_a$  0,75 para o processo Plasma. No trabalho de Tusek [6], o autor realizou uma pesquisa bibliográfica da eficiência do processo TIG segundo dados de vários autores, cujos dados estão mostrados no gráfico da Figura 2, onde é possível notar grande dispersão dos valores, que variam de 0,35 até 0,9.

Dessa forma fica evidente que para os processos com eletrodo não consumível não existe um valor de eficiência do arco determinado para cada processo. Ou seja, o desempenho do processo depende essencialmente das variáveis do processo e dos parâmetros de soldagem utilizados. Para o processo Plasma, seria aceitável esperar variações dos valores de  $\eta_a$  ainda maiores do que o processo TIG, já que existem outros fatores, como a própria concepção da tocha de soldagem combinada com vazão do gás de plasma que certamente podem influenciar nos resultados.

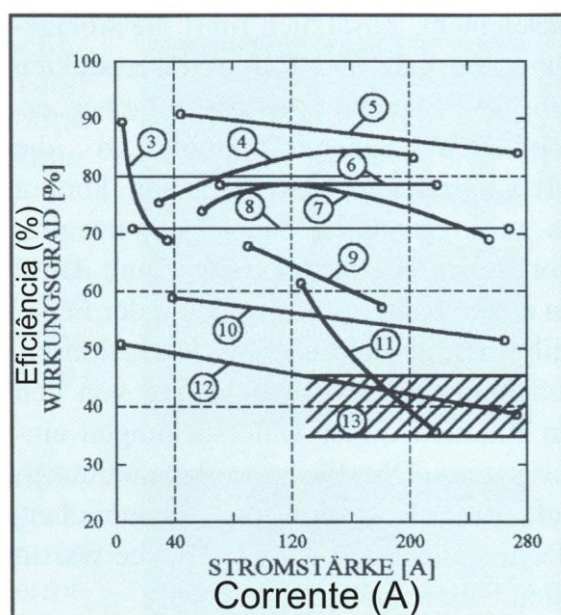


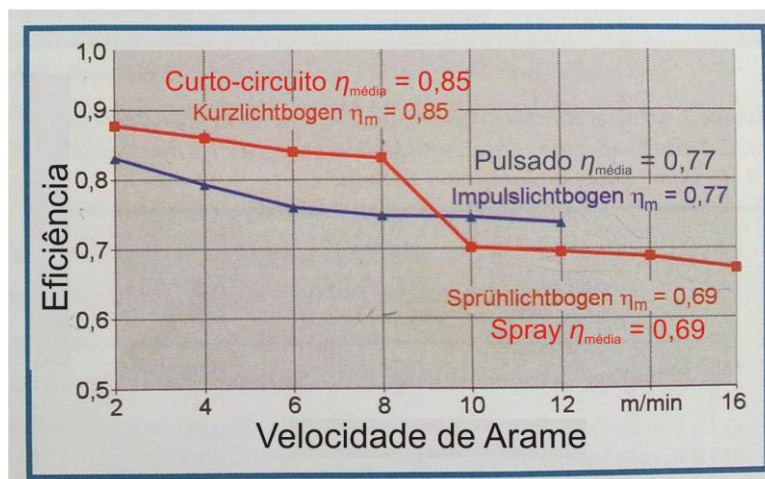
Figura 2 – Eficiência da soldagem TIG em função da corrente (resultados compilados de vários autores). [6]

### 2.3 – Análise da eficiência térmica do processo MIG/MAG

Essa seção do texto pretende mostrar uma análise dos dados da eficiência do arco e eficiência de fusão para o processo MIG/MAG, possibilitando também comparação com os processos que utilizam eletrodo não consumível.

Primeiramente, quando se considera a eficiência do arco, os dados de DuPont e Marder [2] apresentaram valor médio de 0,84, sendo que os valores experimentais variaram entre 0,8 - 0,9, na faixa entre 225-375 A, a princípio sem apresentar uma tendência definida, de maneira que não era possível associar a variação nos valores de  $\eta_a$  com a variação dos parâmetros. Porém, em estudos mais recentes e criteriosos, Kusch et al [5] mostram que a eficiência do arco apresenta variação de acordo com o modo de transferência. A Figura 3 mostra os resultados dos autores, onde se pode observar que os maiores valores de  $\eta_a$  ocorrem para a transferência por curto-circuito com média de 0,85, e para a transferência por spray a eficiência do arco diminui consideravelmente apresentando média de 0,69. Para o MIG/MAG pulsado o valor de  $\eta_a$  foi de 0,77, de maneira intermediária entre o curto-circuito e o spray. Os autores sugerem que o maior valor de eficiência do arco no

modo curto-circuito em relação ao spray poderia ser explicado principalmente por dois motivos: No modo curto-circuito onde o arco é mais curto, as perdas por radiação são proporcionalmente menores do que no spray onde o arco ocupa uma área maior. Além disso, no curto-circuito, devido ao maior *stickout* ocorre proporcionalmente maior aquecimento ao longo do arme-eletrodo por efeito joule, de modo que esse calor gerado também é transferido para a peça. É possível afirmar também que o aumento no comprimento do arco causa um considerável incremento no valor da tensão, aumentando também o valor da potência. Porém, esse aumento da potência não resulta efetivamente em aumento da quantidade de material fundido, fazendo com que a eficiência calculada para o processo diminua. Ou seja, a maior tensão necessária para alimentar a coluna do arco representa somente energia que foi perdida.



**Figura 3 – Eficiência do arco para o processo MIG/MAG para diferentes modos de transferência. Arame de aço carbono 1,2 mm de diâmetro. [5]**

Partindo para análise da eficiência de fusão do processo MIG/MAG, os resultados de Dupont e Marder [2] mostram que na maior parte dos casos  $\eta_m$  ficou entre 0,4 e 0,5, sendo que os ensaios foram realizados com argônio puro no gás de proteção e correntes de soldagem entre 230-400 A. Tusek [6] realizou ensaios usando corrente de 400 A, para mistura Argônio-CO<sub>2</sub> no gás de proteção,  $\eta_m$  foi aproximadamente 0,45, e usando Hélio puro cerca de 0,48. No trabalho de Tusek e Suban [7], os autores realizaram cálculo da  $\eta_m$  para o processo MIG/MAG usando misturas Argônio-Hidrogênio no gás de proteção com percentual de hidrogênio variando entre 0 e 20% e três níveis diferentes de correntes. Os resultados mostraram pouca variação na quantidade de metal fundido e na eficiência de fusão, para a situação com 250 A por exemplo. Mudando de Ar puro para a mistura Ar+20%H<sub>2</sub>, a variação foi respectivamente de 8 para 9 kg/h, e  $\eta_m$  de 0,35 para 0,5. Em experimentos conduzidos no LABSOLDA-UFSC, que estão registrados no trabalho de Schwedersky [8], foram realizados ensaios de soldagem com corrente de 250 A, velocidade de soldagem 5 mm/s, e misturas Ar+2%O<sub>2</sub>, Ar+8%CO<sub>2</sub> e Ar+18%CO<sub>2</sub>, sendo que a eficiência de fusão medida ficou entre 0,34-0,36 para os ensaios com eletrodo no positivo, e para os ensaios com eletrodo no negativo, a eficiência de fusão ficou entre 0,33-0,37.

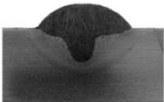

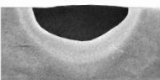
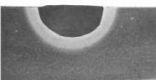
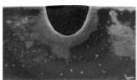
Os resultados de eficiência de fusão citados no parágrafo anterior, são exemplos de condições de soldagem muito diferentes dentro do processo MIG/MAG convencional que certamente proporcionaram para cada situação grande variação no aspecto e formato de cordão, no modo de transferência, estabilidade do arco, taxa de alimentação em relação a corrente, etc. Mesmo com essa variação extrema, a eficiência de fusão do processo praticamente não apresentou grande variação, sendo que os valores de  $\eta_m$  ficaram sempre entre 0,3 e 0,5. Com esses resultados, fica claro que para processo MIG/MAG a capacidade total de gerar fusão é praticamente constante, e não depende essencialmente das características do arco.

Essa afirmação parece inaceitável a primeira vista, sendo lógico que no processo de soldagem a arco, é o arco o elemento fundamental que proporciona praticamente toda a fusão de metal que ocorre. Porém, considera-se que no processo MIG/MAG boa parte da energia térmica transferida para peça é transportada pelas gotas do metal de adição que é fundido, e esse assunto vem sendo abordado por diversos trabalhos ao longo das últimas décadas. Essers e Walter [9] mostram estimativas que a quantidade de energia térmica contida nas gotas de material de adição teoricamente já seria suficiente para suprir cerca de 99% da energia necessária para causar a fusão do material de base que ocorre normalmente em um cordão soldado. Outros trabalhos citam valores diferentes para a parcela de contribuição das gotas. Não é objetivo se aprofundar nessa discussão, mas fica claro que parcela significativa da energia é transportada pelas gotas. Dessa forma, o que se pretende evidenciar é que

no processo MIG/MAG (contrariamente aos processos TIG e Plasma) a maior parte da fusão causada na peça é proporcionada pelas gotas de material fundido, e o papel fundamental do arco é fundir o material de adição que é constantemente alimentado. Por isso, em qualquer condição de utilização estável, o processo MIG/MAG aparentemente irá apresentar valores de eficiência de fusão bastante elevados, na faixa de 0,3-0,5.

#### 2.4 - Comparação entre MIG/MAG e TIG

Ao longo do texto está mostrado que a literatura tradicional tende a considerar os processos TIG e Plasma como de baixo rendimento térmico e baixa produtividade, com desempenho muito inferior ao MIG/MAG e SAW. Porém, já foi possível mostrar que essa classificação muitas vezes é baseada na má interpretação de alguns resultados obtidos em condições específicas, de maneira que os processos com eletrodo não consumível acabam sendo mostrados de maneira pior do que realmente são. Outra questão que merece atenção, é que as comparações entre os processos geralmente são realizadas com base na mesma corrente média, sendo que essa metodologia não é obrigatoriamente a mais adequada para todos os casos. Para alimentar essa discussão, na Figura 4 estão mostrados as imagens dos cordões de solda com processo MIG/MAG e TIG, e também as informações referentes ao procedimento realizado, como corrente e tensão médias, potência calculada, resultados de medições da área fundida, profundidade de penetração e eficiência de fusão. Esses exemplos foram retirados dos experimentos realizados no LABSOLDA. Estão mostrados os dados de um cordão obtido com o processo MIG/MAG usando arame de aço ER70-S6 de 1,2 mm de espessura e corrente de 250 A. Para o processo TIG estão mostrados: um cordão realizado com 250 A e argônio puro no gás de proteção, e mais três cordões soldados com 200, 300 e 400 A usando a mistura Ar+10%H<sub>2</sub>. Nas macrografias desse quadro, a região fundida foi ressaltada para facilitar a visualização do tamanho e formato do cordão. Todas as soldas foram realizadas em chapas de aço de 3/8" de espessura e com velocidade de soldagem de 300 mm/min.

					
Tipo de soldagem	MIG Ar+2%O <sub>2</sub> Vs: 5 mm/s	TIG Ar DEP 1mm Vs: 5 mm/s	TIG Ar+10%H <sub>2</sub> Vs: 5 mm/s	TIG Ar+10%H <sub>2</sub> Vs: 5 mm/s	TIG Ar+10%H <sub>2</sub> Vs: 5 mm/s
Corrente de soldagem	250 A	250 A	400 A	300 A	200 A
Tensão média do arco	30 V	10,2 V	19,2 V	16,5 V	14,8 V
Potência média calculada	7500 W	2550 W	7680 W	4950 W	2960 W
Eficiência de fusão total	0,32	0,18	0,28	0,28	0,26
Área fundida total	45 mm <sup>2</sup>	8 mm <sup>2</sup>	40 mm <sup>2</sup>	26 mm <sup>2</sup>	14 mm <sup>2</sup>
Área fundida Material de Adição	26 mm <sup>2</sup>	-	-	-	-
Área fundida peça	19 mm <sup>2</sup>	8 mm <sup>2</sup>	40 mm <sup>2</sup>	26 mm <sup>2</sup>	14 mm <sup>2</sup>
Penetração	4,0 mm	2,0 mm	4,3 mm	3,7 mm	3,4 mm

**Figura 4 - Comparação do perfil de penetração de diferentes processos de soldagem.**

A primeira consideração que pode ser feita é relativa à comparação para a mesma corrente média do desempenho do processo MIG/MAG e do processo TIG convencional, que é o utilizado com argônio puro no gás de proteção. Nessa situação é possível verificar que no MIG/MAG a quantidade total de metal fundido é cerca de 5 vezes maior, e a profundidade da penetração obtida é o dobro do que o processo TIG convencional. Apesar da corrente média para esse primeiro caso ser a mesma, a potência total calculada para o processo TIG é de apenas aproximadamente um terço da potência calculada para o processo MIG/MAG.

Se for considerado agora uma comparação dos dois processos com a mesma potência média, usando como exemplo o processo TIG com a mistura Ar+10%H<sub>2</sub> e 400 A, é possível notar que a comparação fica bem mais justa. Nesse caso, a quantidade total de metal fundido e profundidade de penetração obtida para os dois processos são semelhantes. Dessa forma, em situações onde a soldagem pode ser realizada de maneira autógena, o processo TIG também teria condições de produzir resultado semelhante ao MIG/MAG em termos de

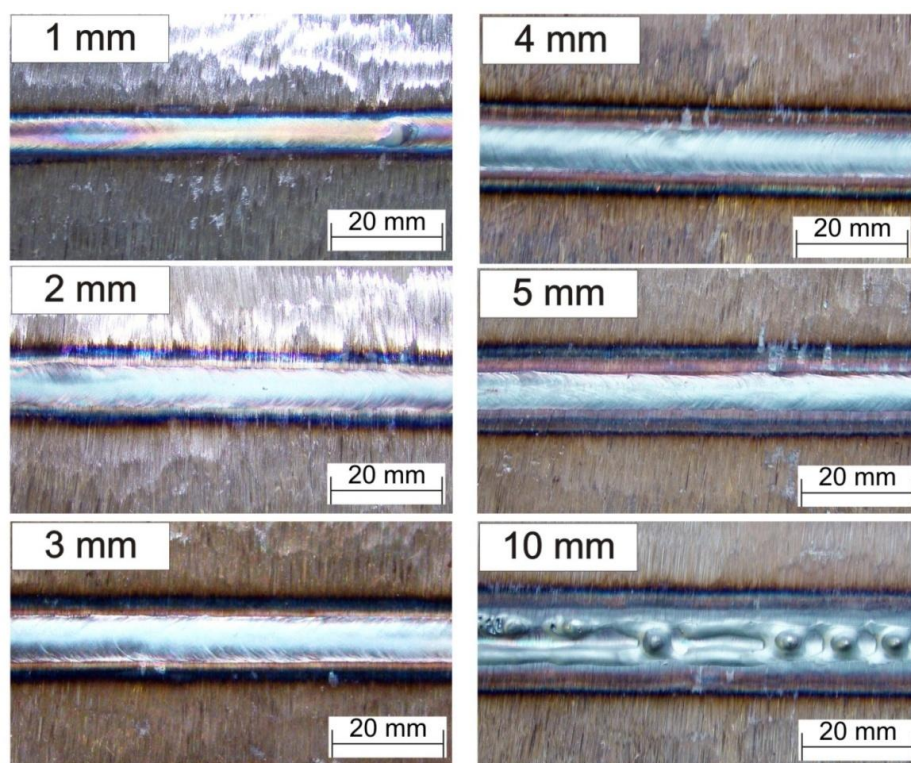
produtividade. Além disso, nessas situações, o TIG apresentaria vantagem pelo fato de não necessitar de material de adição. Com base nos valores da área fundida dos ensaios com 200 e com 300 A, pode-se afirmar a quantidade de metal de base fundido considerando uma mesma corrente média de 250 A do processo TIG usando a mistura Ar+10% $H_2$  seria equivalente à quantidade de metal de base fundido pelo processo MIG/MAG com 250 A.

### 2.5 – Fatores influentes sobre a eficiência de fusão no processo TIG

Com o objetivo de melhorar o entendimento do processo, e fornecer explicação para a variação dos resultados encontrados, foram realizados ensaios de soldagem, avaliando a influência da distância eletrodo-peça (DEP) na eficiência de fusão para o processo TIG. Apesar de se tratar de ensaios relativamente simples, nos trabalhos científicos pesquisados não foram encontrados resultados que mostrassem esse tipo de informação.

Foram realizados ensaios de cordão sobre chapa variando a distância eletrodo-peça entre 1 e 5 mm, e também 10 mm. Todos os ensaios foram realizados na forma de cordão sobre chapa com o eletrodo no negativo e corrente constante de 250 A. As chapas foram de aço carbono de 3/8" de espessura, com velocidade de arco de 5 mm/s, gás de proteção argônio, eletrodo EWTh-2 3,2 mm, afiação 90°, e ângulo da tocha em relação à peça em 90°. Durante os ensaios foram realizadas aquisições dos sinais de corrente e tensão. Após, os corpos de prova foram cortados em duas seções diferentes. As amostras foram preparadas metalograficamente e a área fundida da secção transversal foi medida para calcular a quantidade de metal fundido.

A Figura 5 mostra o aspecto da superfície resultante para cada condição. Para as distâncias eletrodo-peça entre 1 e 5 mm o cordão ficou contínuo, mas na situação de distância 10 mm ocorreu a formação de *humping* ao longo de todo o cordão.



**Figura 5 – Aspecto superficial dos cordões soldados com o processo TIG em diferentes distâncias eletrodo-peça. Corrente de soldagem 250 A. Gás de proteção argônio. Vs: 5 mm/s.**

A Figura 6 mostra as duas macrografias realizadas para cada cordão. Pode-se observar que a situação de soldagem com 1 mm de DEP apresentou maior relação penetração/largura do cordão, e essa relação foi diminuindo com o aumento da distância eletrodo-peça. Para a condição de DEP 10 mm, o fato de ter ocorrido *Humping* no cordão de solda faz com que o valor da medição da área fundida apresente variação de acordo com o local que a amostra foi cortada, ou seja, o valor obtido na medição da área fundida, e conseqüentemente o valor de  $\eta_m$  obtidos para essa condição não são quantitativamente adequados.

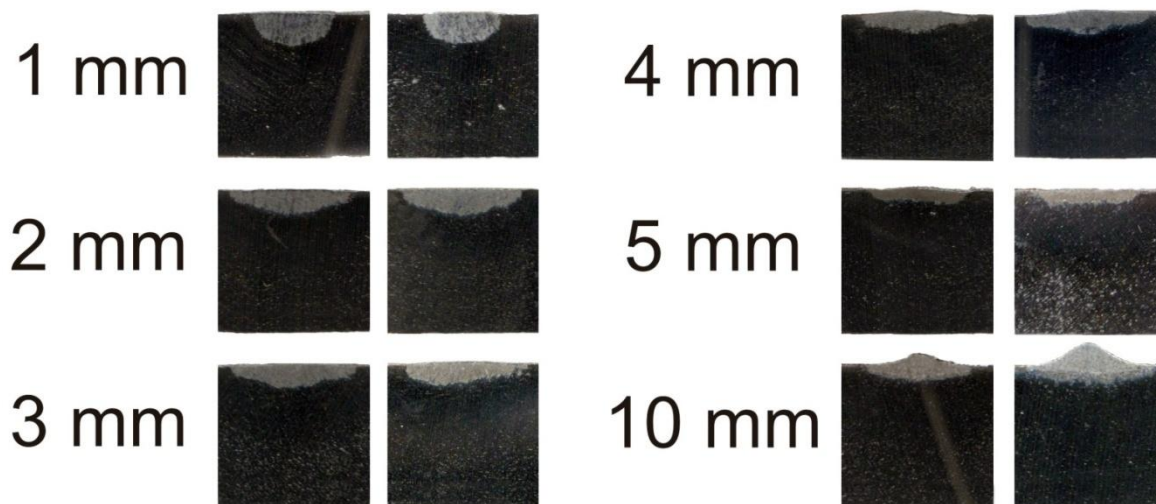


Figura 6 – Macro-seções mostrando a influência da distância eletrodo peça na penetração do cordão de solda utilizando o processo TIG. I: 250 A. gás de proteção: argônio puro. As imagens estão na mesma escala, sendo que a espessura da chapa é de 3/8”.

Os gráficos das Figura 7 e 8 mostram, respectivamente, para cada condição de DEP o resultado da potência e tensão média medida durante a soldagem, a quantidade de material fundido calculado com base na área fundida medida nas macro-seções, e a eficiência de fusão calculada ( $\eta_m$ ).

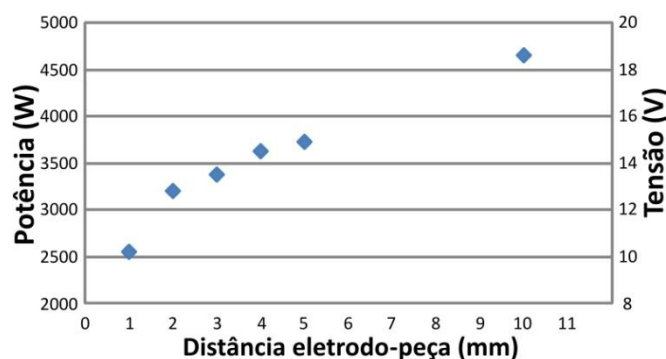


Figura 7 - Variação da tensão e potência para o processo TIG em função da distância eletrodo-peça

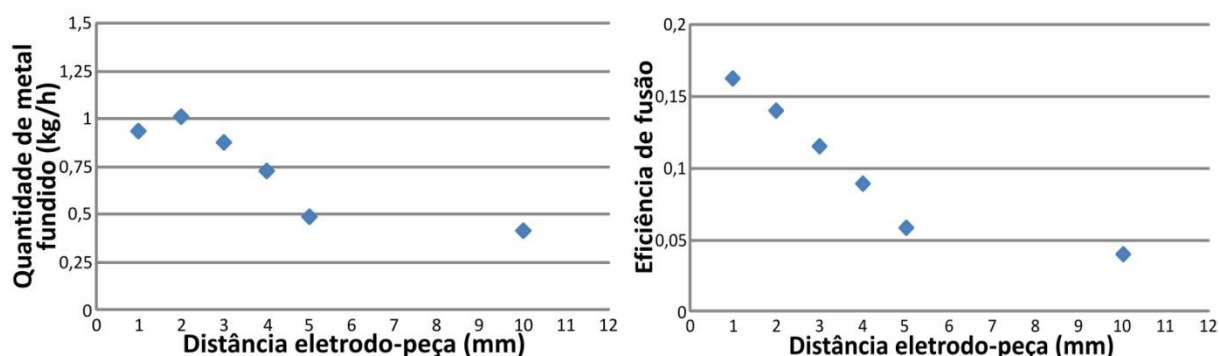


Figura 8 - Quantidade de metal fundido para o processo TIG em função da distância eletrodo-peça. (esquerda). Eficiência de fusão em função da distância eletrodo-peça (direita).

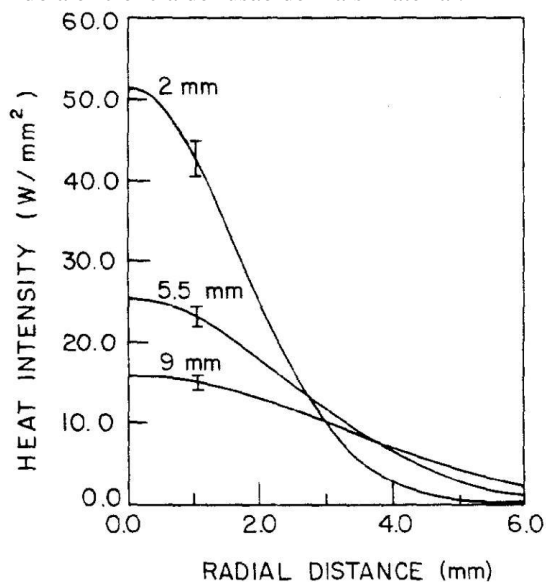
## 2.6 – Análise e discussão dos resultados da eficiência de fusão para o processo TIG

Os resultados dos ensaios mostraram que com o aumento da DEP logicamente ocorreu o aumento da tensão do arco, e da potência elétrica calculada para cada condição, conforme mostrado na Figura 7. A DEP de 2 mm apresentou quantidade de material fundido levemente superior em comparação com a DEP de 1 mm. Para as DEP maiores que 2 mm ocorreu forte diminuição da quantidade de metal fundido. Considerando a eficiência de



fusão, o valor calculado diminuiu de forma pronunciada com o aumento da distância eletrodo-peça. Ocorreu diminuição de cerca de 200% do valor de  $\eta_m$  se comparado com a condição de DEP de 1 e 5 mm.

Para explicar os resultados desses ensaios é possível usar conclusões de outros trabalhos científicos conhecidos: Tsai e Eagar [10] mostram que a distância eletrodo-peça é o principal parâmetro que determina a distribuição do fluxo de calor na superfície do ânodo considerando a mesma intensidade de corrente. Esses autores realizaram medições e calcularam a distribuição e intensidade do fluxo de calor com o processo TIG em ânodo de cobre, e os resultados do trabalho mostram que o aumento da distância eletrodo peça causa aumento da área onde o calor estaria distribuído, porém também causa forte diminuição da taxa de transferência de calor. A Figura 9 mostra os dados dos autores, onde se pode notar que a intensidade medida do fluxo de calor diminui cerca de 3 vezes quando a distância eletrodo-peça aumenta de 2 para 9 mm. Essas informações vão ao encontro dos resultados dos ensaios realizados no presente trabalho: Analisando o perfil de penetração mostrado na Figura 6, fica clara a tendência de aumento da largura do cordão com o aumento da DEP, principalmente considerando o resultado da soldagem com distância de 1 mm, que apresentou perfil com menor largura e maior penetração. As medições mostraram que a quantidade de metal fundido diminuiu com o aumento da DEP, ou seja, a capacidade do processo em gerar fusão na chapa para a mesma corrente média foi diminuída, o que indica que a quantidade total de calor transferida à peça durante a soldagem também diminuiu (apesar da potência média do processo ter aumentado). A exceção foi o resultado com a distância de 1 mm que apresentou área fundida um pouco menor do que a área para 2 mm. Uma explicação proposta para esse fato seria que para a distância de 1 mm, a área de atuação do arco ficou muito pequena, diminuindo a capacidade de absorção de calor para essa situação, resultando na menor capacidade de gerar fusão, ou seja, o arco aqueceu preferencialmente a poça que funcionou como isolante, diminuindo a eficiência de fusão de mais material.



**Figura 9 – Distribuição do fluxo de calor para 100 A com diferentes distâncias eletrodo-peça. [10]**

Se for considerado a potência média para cada condição nos ensaios realizados, cujos resultados estão mostrados na Figura 7, pode-se concluir que a potência elétrica calculada não possui obrigatoriamente correlação com a capacidade de produzir fusão no caso do processo TIG. Existe uma tendência por grande parte dos pesquisadores e profissionais da área de soldagem em considerar que a potência elétrica calculada possui correspondência direta com a quantidade de calor transferido para peça, e quantidade de material fundido. Muitos trabalhos de metalurgia da soldagem usam a potência elétrica calculada, e um coeficiente de rendimento extraído de outros trabalhos, para calcular a “energia imposta” e fazer comparações relativas a transformações metalúrgicas, como se não existissem variações de acordo com a condição que o processo é utilizado. Os resultados aqui apresentados mostram que a eficiência de fusão do processo varia de maneira considerável com a variação dos parâmetros de soldagem. Ou seja, existem grandes chances de se cometer erros se essa variação não for corretamente considerada.

Pode-se afirmar que no processo Plasma, a potência elétrica calculada possui correlação ainda menor com a capacidade de produzir fusão na peça, já que o processo possui um número maior de variáveis que modificam a tensão do arco e também a capacidade de fusão, em comparação com o processo TIG.

Existem alguns motivos, ou melhor, fatos mal explicados, mas que são bastante difundidos, para justificar que boa parte dos profissionais erre ao considerar que a potência esteja obrigatoriamente associada com a quantidade de calor transferida, ou quantidade de metal fundido. Estão aqui citados três deles:

-Comparação entre argônio e hélio: Esses dois gases inertes são os mais utilizados para comparações quando se trata de soldagem TIG. Em comparações com a mesma corrente média, o arco com He acaba fundindo uma quantidade de material muito maior do que o com o Ar. Ao mesmo tempo o arco com He também apresenta maior tensão de arco, resultando em maior potência elétrica calculada. Dessa forma, os profissionais e pesquisadores fazem uma associação incorreta que a maior potência do arco causou maior aquecimento da peça, como se o arco elétrico fosse uma resistência de aquecedor.

-Comparação entre MIG/MAG e TIG: Conforme foi mostrado no item 2.3, o processo MIG/MAG sofre menor variação nos valores de eficiência de fusão, e de forma diferente do que no processo TIG, de modo que a associação entre a potência e quantidade de metal fundido quando realizada apresenta boa correspondência (considerando o processo MIG/MAG convencional). Como a associação funciona de maneira superficialmente aceitável para o MIG/MAG, acaba sendo também erroneamente generalizada para o TIG.

-Tendência natural de aumento de corrente e aumento de potência: Com o aumento da corrente de soldagem no processo TIG, com as mesmas condições (gás de proteção, DEP, material do ânodo, afiação do eletrodo, etc) ocorre também o aumento da tensão do arco (considerando é claro correntes de soldagem maiores do que o ponto de transição, que no caso da soldagem com Argônio é cerca de 60 A). Um cordão TIG realizado com 200 A, resulta em tensão de arco de 12 V, e uma potência elétrica calculada de 2400 W. Nas mesmas condições, o cordão realizado com 300 A apresenta 14 V e 4200 W. O cordão feito com 300 A funde quase o dobro da quantidade de metal de base, e também usou aproximadamente o dobro da potência elétrica. Dessa forma, existe uma tendência natural de associar a potência com a capacidade de fusão. Em várias situações a associação até funciona, mas fisicamente não está correto, mais uma vez não foi a potência que causou a fusão, o arco não é um aquecedor da chapa por resistência.

Nos processos com eletrodo não consumível, a corrente de soldagem é o principal fator que modifica as características do plasma (temperatura, distribuição de temperatura, viscosidade, velocidade das partículas, etc.) e determina a capacidade de produzir fusão. Porém, parâmetros como a DEP também possuem papel fundamental, pois, como foi mostrado nos ensaios, variações na distância eletrodo-peça podem causar variação de 100% na quantidade de material fundido para a mesma corrente. O gás utilizado também possui papel fundamental no processo TIG, sendo que a mudança de um gás para outro é capaz de dobrar a quantidade de material fundido considerando a mesma corrente média, conforme foi mostrado no trabalho de Schwedersky e Dutra [11].

Pode-se dizer que o valor de eficiência de fusão realmente possui correspondência com a produtividade e com a velocidade de soldagem, apesar de não ser o único fator determinante. Concorda-se com o que foi exposto por DuPont e Marder [2], que a realização de soldagens em elevadas velocidades (que considera-se aqui 1 m/min, por exemplo) requer um arco com grande capacidade de transferir calor para a peça já que é necessário compensar a diminuição do tempo disponível para a energia se transferir da fonte calorífica ao substrato, ou seja, um arco que possua grande capacidade de gerar fusão. Sendo assim, quando se trata de obter velocidade de soldagem elevada, o processo que apresenta maior  $\eta_m$  possui antecipadamente um aspecto vantajoso em relação aos processos com menor  $\eta_m$ . Apesar disso, mesmo processos de soldagem com baixa eficiência de fusão, se conseguirem proporcionar a quantidade de material fundido necessário para determinada aplicação, podem apresentar velocidades de soldagem tão ou mais elevadas do que os processos com maior eficiência.

Levando em consideração as informações expostas nos itens anteriores, fica claro que existe a necessidade de melhorar as informações do material técnico usado no ensino e pesquisa de soldagem. Com as informações dos diferentes trabalhos foi possível realizar uma análise dos principais pontos relacionados com a eficiência térmica dos processos:

Quanto aos valores de eficiência do arco, foi possível verificar que a afirmação proposta por DuPont e Marder [2], na qual os processos com eletrodo consumível (MIG/MAG e SAW) sempre apresentam  $\eta_a$  maior do que os processos com eletrodo não consumível (TIG e Plasma) não está correta. Essa afirmação foi baseada nos resultados de medições de  $\eta_a$  em condições específicas para cada processo, condições essas que foram erroneamente consideradas como comportamento padrão dos processos. Porém, conforme já foi afirmado anteriormente, não existe um valor de  $\eta_a$  fixo para cada processo. Em trabalhos como o de Kusch et AL [5], são apresentados valores de  $\eta_a$  que são maiores para o TIG e Plasma do que para o MIG/MAG dependendo da situação em que a comparação é feita.

Analisando os resultados de eficiência do arco de diferentes autores é possível inferir que esse indicador não é parâmetro a partir do qual se possa associar com a produtividade ou velocidade de soldagem do processo, ao contrário do que DuPont e Marder [2] sugerem em seu trabalho. Pode-se considerar que os valores de eficiência do arco servem somente para determinar o desperdício de eletricidade de cada processo. Por exemplo, o valor de  $\eta_a$  0,85 do MIG/MAG com curto-circuito não faz com que o processo obtenha maior velocidade de soldagem do

que no modo spray que tem  $\eta_a$  de 0,69. Da mesma forma o valor de  $\eta_a$  0,76 medido por Kusch et AL [5] para o TIG usando Argônio puro não significa que esse processo tem alguma vantagem em relação ao MIG/MAG spray somente por conta do valor. Além disso, o valor da eficiência do arco não considera a concentração da fonte calorífica. Situações com fonte mais difusa poderiam apresentar maior eficiência térmica, porém com baixa eficiência de fusão bastante reduzida.

### 3- Conclusões

As principais conclusões sobre as questões de eficiência térmica dos processos de soldagem a arco que foram apontadas ao longo do presente trabalho são:

- Com relação à eficiência do arco não é correto afirmar que cada processo possui um valor de  $\eta_a$  fixo. Os dados das medições dos diferentes autores mostram que o valor de  $\eta_a$  pode variar com grande intensidade principalmente para os processos TIG e Plasma, mas também apresentam variação não desprezível no caso do processo MIG/MAG. Além disso, foi possível verificar que a afirmação na qual os processos com eletrodo consumível (MIG/MAG e SAW) sempre apresentam valores de  $\eta_a$  maiores do que os processos com eletrodo não consumível (TIG e Plasma) não está correta.

- Com base na análise de diferentes trabalhos, não se considera correto afirmar que a energia perdida para o eletrodo de tungstênio seja a principal causa da pior eficiência do arco dos processos com eletrodos não consumíveis em relação aos processos com eletrodos consumíveis.

- Analisando resultados de eficiência do arco dos diferentes processos chega-se a conclusão que esse indicador não é um parâmetro que está diretamente associado com a produtividade ou velocidade de soldagem do processo, ao contrário do que alguns autores sugerem. Além disso, o valor da eficiência do arco não considera a concentração da fonte calorífica. Situações com fonte mais difusa poderiam apresentar elevada eficiência térmica, porém com baixa eficiência de fusão bastante reduzida.

- Quando se trata da eficiência de fusão, também é importante ressaltar que não existe um determinado valor de  $\eta_m$  fixo para cada processo de soldagem. Por isso, o valor de  $\eta_m$  deve ser determinado em cada condição, pois os dados de outros autores dificilmente irão representar a mesma situação que se pretende analisar, podendo induzir a erros.

- A distância eletrodo-peça apresenta grande influência no resultado da eficiência de fusão no processo TIG, sendo que o aumento da distância causa forte diminuição do valor obtido.

- A principal questão relativa aos valores de eficiência de fusão é que existe uma grande diferença entre os processos com eletrodo não consumível e processos com eletrodo consumível. Analisando os resultados dos diversos autores, é possível concluir que o processo MIG/MAG apresenta valores de  $\eta_m$  elevados, entre 0,3 e 0,5, independentemente das condições que o processo está sendo utilizado. Já para processos como TIG e Plasma, a eficiência de fusão depende totalmente dos parâmetros de soldagem, podendo apresentar valores muito baixos, bem próximos a zero, e até valores relativamente elevados entre 0,3-0,4, de maneira semelhante aos obtidos com o processo MIG/MAG.

- É importante destacar que apesar de os processos com eletrodos não consumíveis (TIG e Plasma) apresentarem na maior parte das vezes valores de  $\eta_m$  menores do que os dos processos com eletrodos consumíveis (MIG/MAG e SAW), quando se considera somente a parcela do metal de base fundido, os processos com eletrodo não consumíveis tendem a apresentar maior eficiência. Isso pode representar vantagem em situações onde o uso de metal de adição não é obrigatório.

### 4 – Referências Citadas

- [1] AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding Handbook - Welding Science and Technology**. 9ª Edição. ed. [S.l.]: AWS, v. 1, 2001.
- [2] DUPONT, J. N.; MARDER, A. R. **Thermal Efficiency of Arc Welding Processes**. Welding Journal, p. 406-416-s, December 1995.
- [3] FUERSCHBACH, P. W.; KNOROVSKY, G. A. **A Study of Melting Efficiency in Plasma Arc and Gas Tungsten Arc Welding**. Welding Journal, p. 287-297-s, November 1991.
- [4] COLLINGS, N.; WONG, K. Y.; GUILLE, A. E. **Efficiency of tungsten-inert-gas arcs in very-high-speed welding**. Proc. Inst. Electr. Engr., vol. 126; , 1979. 276-280.
- [5] KUSCH, M.; HÄLSIG, A.; THURNER, S. **Bestimmung von Wirkungsgraden an Schutzgas-schweiBverfahren**. Schweissen und Schneiden, p. 30-33, fev 2011.
- [6] TUSEK, J. **Wirkungsgrad des LichtbogenschweiBens**. Schweissen und Schneiden, v. 7, p. 406-411, Juli 1999.

- [7] TUSEK, J.; SUBAN, M. **Experimental research of the effect of hydrogen in argon as a shielding gas in arc welding of high-alloy stainless steel.** International Journal of Hydrogen Energy, n. 25, p. 369-376, 2000.
- [8] SCHWEDERSKY, M. B. **Relatório de Estágio Supervisionado IV, Curso de Graduação em Engenharia de Materiais.** LABSOLDA - UFSC. Florianópolis, p. 17-26. 2007.
- [9] ESSERS, W. G.; WALTER, R. **Some Aspects of the Penetration Mechanisms in Metal Inert Gas (MIG) Welding.** Arc Physics and Weld Pool Behaviour - International Conference, London, p. 289-300, 8-10 May, 1979.
- [10] TSAI, N. S.; EAGAR, T. W. **Distribution of the Heat and Current Fluxes in Gas Tungsten Arcs.** Metallurgical Transactions B, v. 16B, p. 841-846, December 1985.
- [11] SCHWEDERSKY, M. B.; DUTRA, J. C. **Soldagem TIG de Elevada Produtividade: Influência dos Gases de Proteção na Velocidade Limite para Formação de Defeitos.** XXXVI CONSOLDA, Recife, Out. 2010.