

Influência do Material de Base sobre o Rendimento de Fusão em Soldagem a Arco

(Influence of Base Material on the Melting Efficiency in Arc Welding)

Ruham Pablo Reis¹, André Luis Gonçalves da Costa¹; Fernanda Mendonça Silveira¹; Paulo Rosa da Mota¹; Robson José de Souza¹,
Américo Scotti¹

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Laprosolda, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil,
ruhamreis@mecanica.ufu.br; ascotti@ufu.br

Resumo

O objetivo deste trabalho foi determinar o comportamento do rendimento bruto de fusão em soldagem a arco frente a diferentes tipos de material de base (aço ao carbono, aço inoxidável e alumínio). Como extensão, objetivou-se também estimar de forma indireta o rendimento térmico do processo em questão usando-se estimação de isotermas por método analítico. Para isto, foram feitas soldagens sobre placas de teste utilizando-se o processo TIG nos três materiais em dois níveis de corrente de soldagem. Foi verificado que o rendimento bruto de fusão é muito baixo (menor que 10%), mas tende a aumentar com a elevação do nível de corrente de soldagem (efeito da dimensão da peça). O alumínio apresentou o menor rendimento de fusão, tendo o aço inoxidável apresentado o melhor aproveitamento do calor imposto. Em relação ao rendimento térmico, a metodologia proposta não se mostrou adequada.

Palavras-chave: Soldagem, Rendimento de Fusão, Rendimento Térmico, TIG CA.

Abstract. The aim of this work was to determine the behavior of the gross melting efficiency in arc welding towards different types of materials (carbon steel, stainless steel and aluminum alloy). An extra objective was to indirectly estimate the thermal efficiency of the process using the estimation of isotherms by analytic methods. For that, welds were carried out over three materials at two welding current levels using the GTAW process. It was verified that the melting efficiency is very low (lower than 10%), yet it rises by increasing the current level (effect of material size). The aluminum alloy presented the lowest melting efficiency in contrast to the highest heat yield of the stainless steel. With respect to the thermal efficiency, the proposed methodology was not adequate.

Key-words: Welding, Melting Efficiency, Thermal Efficiency, AC GTAW.

1. Introdução

Em soldagem de uma forma geral, existe uma grande tendência em se dar importância ao rendimento térmico dos processos de soldagem (η_t), que é a razão entre o calor transferido para o material a ser soldado (Q_{imp}) e a energia elétrica fornecida pela fonte de soldagem (E). A Tabela 1 apresenta dados de η_t compilados por Fuerschbach [1] para diversos processos. Como se vê, cada processo apresenta valores ou faixas de η_t com os quais pesquisadores podem fazer previsão do ciclo térmico sob o qual a solda estará sujeita e das possíveis alterações metalúrgicas e respectivas propriedades mecânicas decorrentes.

Apesar da importância do rendimento térmico sob o ponto de vista de soldabilidade, o rendimento bruto de fusão (η_p), que relaciona o calor que realmente foi utilizado para promover a formação da poça de um dado material (Q_p) com a energia elétrica fornecida pela fonte de soldagem (E), é muitas vezes pouco explorado. Na verdade, a definição de rendimento de fusão pode alcançar outras abordagens, como a de que relaciona

o calor que realmente foi utilizado para promover a fusão de material com o calor realmente imposto pelo arco de soldagem. Esta definição leva ao termo de rendimento efetivo (ou líquido) de fusão (η_{ef}), já que na prática seria a razão entre o calor que realmente foi utilizado para promover a fusão de material (Q_f) e a energia da fonte de soldagem (E), mas levando-se em conta o rendimento térmico do processo de soldagem (η_t). Seja o rendimento bruto ou o rendimento efetivo, ambos são de difícil quantificação (naturalmente maior para o rendimento líquido). Assim, de uma forma geral, a quantidade de trabalhos que estudam o rendimento de fusão é escassa, dando-se muitas vezes ênfase somente ao rendimento térmico [2].

Mas, na verdade, o rendimento de fusão é de suma importância para avaliar a eficiência de um processo sobre as características operacionais do mesmo, por exemplo, casos em que se busca o aumento de produtividade (produzir cordões com o mínimo de fusão do material de base, gastando-se o mínimo de energia, mas completando o cordão com o máximo de velocidade (ou seja, a relação entre taxa de fusão e energia imposta). É importante ressaltar que soldas com baixo rendimento de fusão resultam em aquecimento excessivo do metal de base, aumentando as chances de danos estruturais (trincas e distorções, por exemplo) e micro-estruturais (mudanças metalúrgicas e precipitações de fases, etc.). Fuerschbach e Eisler [3], apesar de não apresentarem

(Recebido em 08/06/2011; Texto final em 17/12/2011).

Tabela 1. Rendimentos térmicos para processos de soldagem por fusão [1]

	Processo de Soldagem					
	MIG	Laser CO ₂	TIG	Plasma	Arco Submerso	Eletrodo Revestido
η_t	85%	20-90%	67-80%	47-75%	90%	75%

resultados referentes a processos de soldagem a arco, mostraram que para Laser CO₂ o rendimento líquido de fusão varia de 30 a 50% e é função da velocidade de soldagem. Já segundo Karkhin et al. [4], este valor é de cerca de 48%.

A razão para se usar geralmente apenas o η_t , dentre outras, parece residir na tradição metalúrgica das pesquisas em soldagem, mesmo que a determinação do η_{bf} possa ser até mais simples do que a determinação do η_t . Desta forma, o objetivo deste trabalho é aplicar e avaliar uma metodologia prática de determinação do efeito do material de base sobre o rendimento bruto de fusão em soldagem a arco. Além disso, para comparar resultados deste trabalho com os encontrados na literatura, propõe-se também usar uma metodologia para determinar indiretamente o rendimento térmico do processo.

2. Metodologia e Procedimento Experimental

Na execução dos experimentos, foi utilizada uma mesma condição de soldagem para três materiais diferentes, a saber: aço de baixo carbono, aço inoxidável austenítico e uma liga comercial de alumínio. As dimensões das placas de teste (47 mm x 195 mm x 6,4 mm) foram mantidas constantes para todos os materiais. Para a execução das soldagens, utilizou-se o processo TIG automático em CA com onda quadrada (de forma a se conseguir soldar os três tipos de materiais em mesmas condições), com eletrodo torinado (diâmetro de 2,4 mm), em posição plana e sem material de adição. O gás de proteção utilizado foi argônio puro (comercial). Além disso, a distância eletrodo-peça foi sempre mantida em 2 mm como forma de minimizar possíveis perturbações no arco. Os parâmetros de soldagem, tensão e corrente, foram monitorados por um sistema de aquisição A/D de dados, a uma taxa de 10 kHz por canal e com resolução de 12 bits.

Para a realização da soldagem, foram tomados os devidos cuidados com relação à preparação e fixação das placas de teste. Estas foram limpas por meio de escovas (apropriadas conforme as características de cada material) para remoção de óxidos e impurezas presentes em suas superfícies. A fixação foi feita por meio de um suporte de aço carbono, sendo que as chapas foram devidamente apoiadas em 3 roletes que foram posicionados de maneira a minimizar a distorção das mesmas e a perda de calor por condução para o suporte. A Figura 1 mostra o sistema de fixação utilizado.

Antes de proceder à soldagem, utilizou-se o modelo baseado na teoria de Rosenthal [5] para assegurar que se trabalharia, por opção, sempre na condição de chapa espessa (fluxo de calor tridimensional). De acordo com o modelo proposto, para a dissipação de calor ser tridimensional, a chapa deve possuir uma espessura mínima. Através da Equação 1, pode-se estimar

a energia máxima que pode ser imposta sobre a chapa (chapa de teste) para que esta ainda seja considerada espessa.

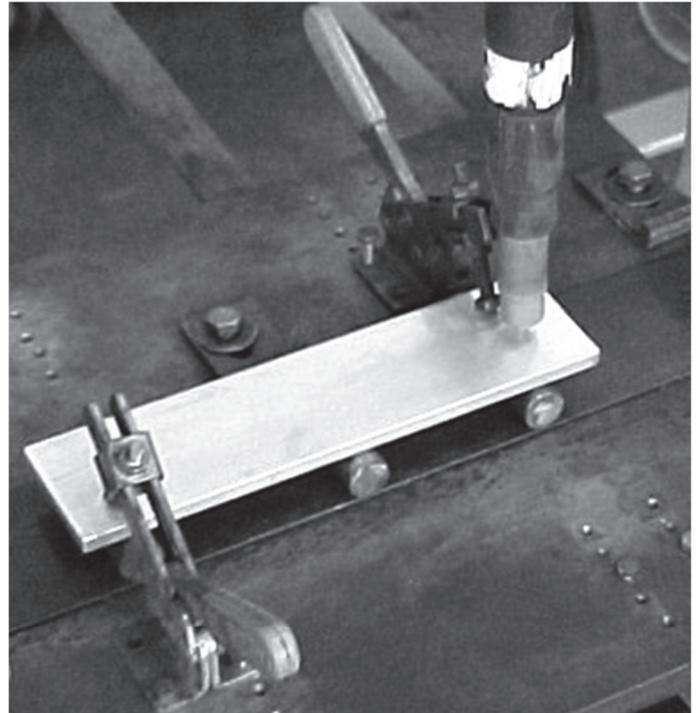


Figura 1. Suporte utilizado para fixação das placas de teste

$$\tau = h \sqrt{\frac{\rho c(T_f - T_0)}{\frac{\eta_t UI}{v_{sol}}}} \quad (1),$$

onde h é a espessura da chapa, ρ a densidade do material, c o calor específico do mesmo, T_f sua temperatura de fusão (garantia de formação da poça de fusão), T_0 a temperatura de pré-aquecimento (neste caso a ambiente), η_t o rendimento térmico do processo, v_{sol} a velocidade de soldagem e o produto UI (tensão pela corrente de soldagem) a potência elétrica fornecida. Segundo o proposto por Rosenthal [4], para que a chapa seja considerada espessa, τ deve ser maior que 0,9.

Considerando o caso do alumínio, que se acreditava ser a situação mais crítica, pelo mesmo possuir a maior condutividade térmica e menor temperatura de fusão ($h = 0,64$ cm, $\rho = 2,8$ g/cm³, $c = 0,9$ J/g°C, $T_f = 649$ °C, $T_0 = 25$ °C) e considerando uma velocidade de soldagem de 20 cm/min e um rendimento térmico do processo de soldagem TIG CA de 43% [6], da Equação 1 pode-se, então, estimar que a máxima energia de soldagem que pode ser imposta sobre o corpo confeccionado deste material para que o fluxo de calor seja tridimensional é de cerca de 616 W. Como a tensão eficaz resultante do processo TIG gira em torno de 12 V, pode-se dizer que a corrente máxima de soldagem

Tabela 2. Parâmetros de soldagem

Corrente (A)	Vazão (l/min)	v_{sol} (cm/min)	DEP (mm)	t + (ms)	t – (ms)
150	10	20	2	2	20
175	10	20	2	2	20

Nota: DEP = distância eletrodo-peça, v_{sol} = velocidade de soldagem e t = tempo em cada polaridade.

Tabela 3. Parâmetros geométricos dos cordões de solda obtidos

Corrente de soldagem (A)	Parâmetro geométrico	Material					
		Aço carbono		Aço inoxidável		Alumínio	
		Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
	Penetração (mm)	1,70	0,04	1,29	0,05	1,12	0,03
150	Largura (mm)	4,49	0,39	5,20	0,05	4,55	0,12
	Área fundida (mm ²)	5,08	0,51	4,73	0,20	3,64	0,29
175	Penetração (mm)	1,84	0,02	1,66	0,01	1,80	0,13
	Largura (mm)	5,46	0,21	5,95	0,46	6,37	0,23
	Área fundida (mm ²)	6,77	0,22	6,40	0,59	8,14	0,81

que pode ser aplicada para assegurar as condições requeridas é de cerca de 50 A.

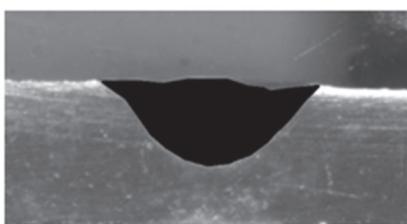
A partir deste resultado, efetuou-se a soldagem em uma placa de teste de alumínio e verificou-se, após análise macrográfica, que o objetivo de se conseguir um fluxo tridimensional havia sido obtido, mas a área fundida obtida tinha dimensões tão reduzidas que não haveria sensibilidade suficiente para execução das medições geométricas que seriam posteriormente usadas na determinação do rendimento bruto de fusão.

Como se necessitava de uma área fundida de maiores dimensões, um aumento na energia de soldagem utilizada foi promovido para uma condição em que a penetração resultante não superasse 1/3 da espessura da chapa, ou seja, penetração máxima de 2,1 mm (atendendo-se, ainda, o critério de dissipação tridimensional de calor nos três materiais). Foram, então, feitos testes em dois níveis de corrente de soldagem, 150 e 175 A (que em testes preliminares demonstraram atender a meta de penetração), para cada tipo de material. A Tabela 2 mostra os parâmetros de soldagem utilizados em ambos os níveis de corrente.

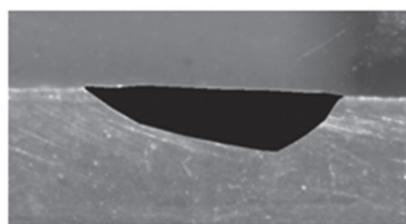
As soldagens foram realizadas no centro de cada corpo de prova, sendo que cada cordão foi iniciado e finalizado a 10 mm da extremidade das chapas, sendo retiradas em seguida, para análise geométrica, três seções transversais de cada corpo de

prova. Estas amostras foram retiradas sempre com o mesmo espaçamento e descartando as extremidades dos cordões. Os corpos de prova, após a soldagem, foram então seccionados em uma cortadeira metalográfica e lixados com lixas de granulação 220, 320, 400 e 600, sendo em seguida atacados quimicamente para a revelação da zona fundida para posterior medição dos parâmetros geométricos (largura, penetração e área fundida) por meio de aquisição digital de imagens e tratamento por softwares comerciais.

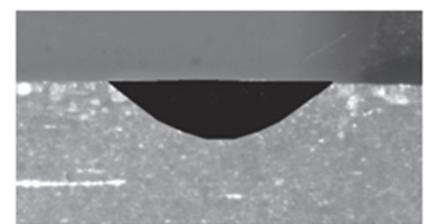
A Tabela 3 mostra os parâmetros geométricos obtidos para cada material nos dois níveis de corrente utilizados e as Figuras 2 e 3 ilustram as seções transversais típicas de cada condição de soldagem, nas quais a área fundida foi sombreada para facilitar sua visualização. Pode-se observar que, utilizando o nível de corrente de 150 A, a maior área fundida ocorreu no corpo de prova de aço carbono, seguido pelo de aço inoxidável e finalmente pelo de alumínio. No entanto, com a elevação do nível da corrente de soldagem para 175 A, o alumínio passou a apresentar a área fundida mais relevante, vindo a seguir o aço carbono e aço inoxidável. Esta inversão na ordem de grandeza das áreas fundidas pode ter ocorrido devido à possibilidade do fluxo de calor ter passado a ser bidimensional (chapa fina) no corpo de prova de alumínio para o nível de corrente de 175 A.



Aço carbono



Aço inoxidável



Alumínio

Figura 2. Seções transversais dos cordões realizados com 150 A

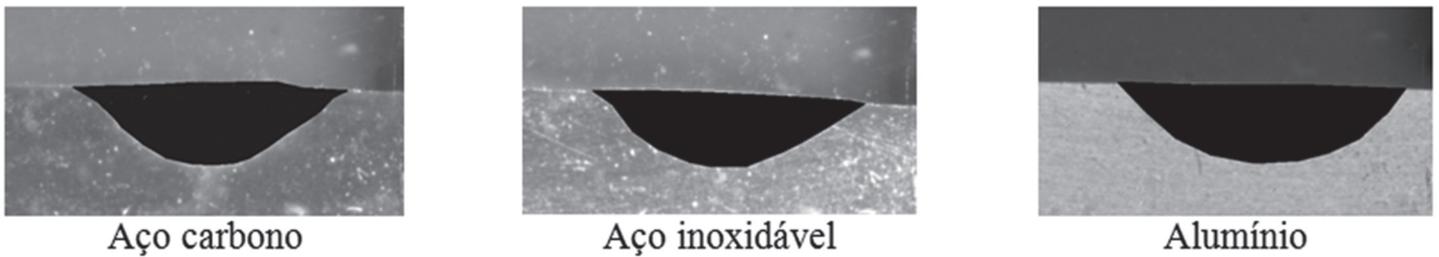


Figura 3. Seções transversais dos cordões realizados com 175 A

Em seguida, a partir das áreas fundidas, das propriedades físicas dos materiais e com o auxílio de parâmetros termodinâmicos, as energias necessárias para fundir os volumes dos cordões foram calculadas e usadas para determinar os rendimentos brutos de fusão. Esses cálculos partiram da idéia de que a formação da poça é um processo térmico sob o qual um volume do material de base (não há material de adição) está sujeito, sendo regido pelo aquecimento até a sua temperatura de fusão (calor sensível de aquecimento), pelo calor latente de fusão desse volume, pelo aquecimento entre as temperaturas de fusão e a de evaporação (calor sensível de superaquecimento) e pelo calor latente de vaporização. Das leis da termodinâmica sabe-se que:

$$Q_f = m_p c_p \Delta T_f + m_p L_f + m_p c_p \Delta T_s + m_v L_v \quad (2),$$

onde Q_f é o calor gasto para formação da poça, m_p é a massa da poça antes de qualquer perda por evaporação, c_p é o calor específico do material de base numa dada faixa de temperatura, T_f é a variação de temperatura da ambiente (T_0) até a de fusão (T_p), L_f é o calor latente de fusão, T_s é a variação de temperatura desde a temperatura de fusão (T_p) até a de vaporização (T_v), m_v a massa vaporizada e L_v é o calor latente de vaporização.

Para esse estudo, a parcela referente ao calor sensível do superaquecimento da poça e aquela referente ao calor latente de

vaporização foram assumidos como desprezíveis. Esta simplificação foi adotada uma vez que superaquecimentos, conseqüentemente evaporações, podem ser tomados como desprezíveis no volume de uma poça de fusão em soldagem, pois o calor para causá-los seria nesse fenômeno consumido para fundir uma maior massa do material, considerando que a velocidade da frente de fusão é igual à velocidade de soldagem, portanto já representada pelo parâmetro m_p . Desprezando também a variação das propriedades físicas dos materiais em questão com a mudança de temperatura e considerando a poça de fusão como uma substância pura e que sua massa pode ser representada em termos de sua densidade (ρ) e volume (V_p), a Equação 3 permite representar razoavelmente o fenômeno em estudo.

$$Q_f = \rho V_p c_p (T_f - T_0) + \rho V_p L_f \quad (3).$$

Considerando um comprimento unitário de cordão, o volume da poça assume numericamente o valor da área fundida (A_f). Então:

$$Q_f = \rho A_f c_p (T_f - T_0) + \rho A_f L_f \quad (4).$$

A Tabela 4 apresenta as principais propriedades físicas dos materiais utilizados, várias delas necessárias ao cálculo do calor efetivamente utilizado para a formação da poça.

Tabela 4. Propriedades físicas dos materiais analisados [7]

Propriedades	Material		
	Aço carbono	Aço Inoxidável	Alumínio
Condutividade térmica (W/cm·K)	0,519	0,163	1,37
Calor específico (J/g·°C)	0,45	0,58	0,9
Temperatura de fusão (°C)	1550	1410	649
Densidade (g/cm³)	7,87	7,90	2,88
Calor latente de fusão (J/g)	247	265	396

Tabela 5. Calor efetivamente consumido durante a fusão

Corrente de Soldagem (A)	Material	Calor (J/cm)
150	Aço Carbono	372
	Aço Inoxidável	399
	Alumínio	97
175	Aço Carbono	496
	Aço Inoxidável	539
	Alumínio	217

Tabela 6. Valores de tensão e corrente eficazes e potência elétrica

Material	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência – UxI (W)	Potência Instantânea (W)
Aço Carbono	12,5	150	1875	1654
Aço Inoxidável	11,9	150	1785	1528
Alumínio	10,6	151	1601	1477
Aço Carbono	13,7	174	2384	2079
Aço Inoxidável	12,2	174	2123	1813
Alumínio	10,7	175	1873	1709

Tabela 7. Rendimento bruto de fusão para as condições testadas

Material	Corrente (A)	Energia (J/cm)	Calor (J/cm)	Rendimento bruto de fusão (%)
Aço Carbono	150	4962	372	7,51
Aço Inoxidável		4584	399	8,69
Alumínio		4431	97	2,19
Aço Carbono	175	6237	496	7,95
Aço Inoxidável		5439	539	9,90
Alumínio		5127	217	4,24

Já de posse de todos os dados necessários, é possível estimar o calor efetivamente utilizado para a fusão dos diferentes materiais em ambos os níveis de corrente. A Tabela 5 apresenta o resultado deste cálculo. Observa-se que a quantidade de calor consumida para a fusão do alumínio foi bem menor se comparada à quantidade necessária para os dois tipos de aço.

A Tabela 6 mostra os valores de potência elétrica utilizada. Foram utilizados dois métodos de cálculo. Pelo simples produto da corrente eficaz pela tensão eficaz e efetuando a média do sinal de potência obtido através do produto instantâneo de cada valor dos parâmetros elétricos medidos durante a realização dos experimentos. Adotou-se o segundo método, pois este seria mais adequado. Segundo Joseph [8], se os valores de corrente e tensão eficazes forem apenas multiplicados, a tendência é que o calor teoricamente transferido para a chapa seja até 10% mais elevado que o real.

3. Rendimento Bruto de Fusão: Resultado e Discussão

Como já se conhece a potência fornecida pelo processo de soldagem para cada combinação de material e corrente, pode-se calcular a energia gasta para cada uma dessas combinações:

$$E = \frac{IU}{v_{sol}} = \frac{W}{v_{sol}} \quad (5),$$

onde E é a energia elétrica fornecida pela fonte de soldagem, I é a corrente de soldagem, U é tensão de arco, v_{sol} é a velocidade soldagem e W é a potência fornecida pelo processo. A Tabela 7 mostra os rendimentos bruto de fusão para cada uma das condições testadas. É importante se destacar que, a rigor, o rendimento efetivo de fusão deveria ser calculado usando a energia imposta pelo processo de soldagem à chapa, o que corresponderia a eliminar o calor perdido para o meio ambiente, representado pelo rendimento térmico de soldagem (relação

entre a energia do processo de soldagem e o calor transferido para a chapa, seja para fundir ou só para aquecê-la). Porém, dada a dificuldade de se determinar este valor com precisão, neste trabalho tratar-se-á do rendimento bruto de fusão, que engloba o rendimento térmico e o rendimento efetivo de fusão.

A Figura 4 ilustra a relação entre o material e o rendimento bruto de fusão. Pode-se perceber que apenas uma parcela bem pequena da energia do arco é transformada em trabalho útil (para fundir a chapa). Entretanto, é importante ressaltar que seria esperado com o uso de TIG CC-, aplicável somente para o aço carbono e aço inoxidável, um maior rendimento bruto de fusão (mesmo que no presente caso, TIG CA, o arco esteve na polaridade positiva somente em 9% do tempo).

É bem provável que o alumínio tenha apresentado o menor rendimento bruto de fusão por possuir o maior calor específico e a maior condutividade térmica dentre os materiais testados, apesar de possuir, no entanto, a menor temperatura de fusão. O calor necessário para aquecer o material seria melhor representado pela capacidade térmica, que é uma relação direta entre o calor específico e a densidade (no caso do alumínio, uma menor densidade compensa na comparação o efeito do seu elevado calor específico). Por outro lado, o alumínio dissipa rapidamente grande parte do calor imposto pelo processo de soldagem, ao invés de aproveitá-lo para promover a sua fusão. Já com o aço inoxidável provavelmente ocorre fenômeno inverso. Como esse material possui uma condutividade térmica bem menor se comparado ao alumínio, o calor imposto é mais bem aproveitado para a fusão, apesar de possuir um ponto de fusão superior ao do alumínio. Pode-se dizer que com o aço carbono ocorre uma condição intermediária com relação às suas propriedades, resultando assim em um rendimento bruto de fusão também intermediário. Dessa forma, em coerência com Fuerschbach e Eisler [3] e Karkhin et al. [4], evidências são mostradas de que a soldagem TIG CA tem um rendimento bruto de fusão bem

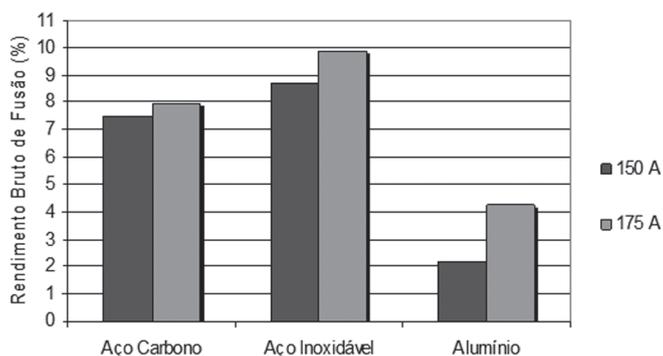


Figura 4. Influência do tipo de material sobre o rendimento bruto de fusão

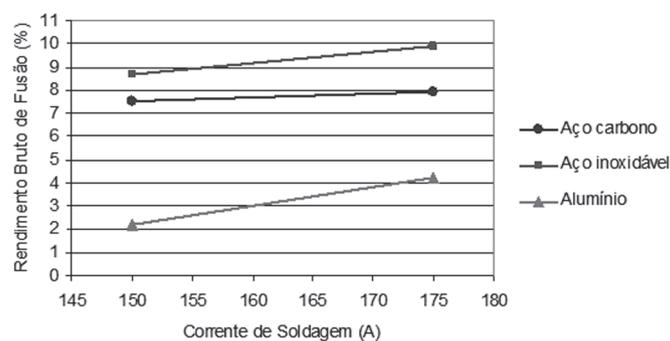


Figura 5. Influência da corrente de soldagem sobre o rendimento bruto de fusão

inferior a processos tradicionalmente mais eficientes como, por exemplo, a soldagem a laser.

Nota-se também na Figura 4, com mais destaque (clareza) na Figura 5, que há uma influência do valor da corrente (ou da energia de soldagem) sobre o rendimento bruto de fusão. Quanto maior a corrente, maior o rendimento. Possivelmente, a razão para tal é que as placas de teste não trabalharam com a mesma capacidade de dissipação de calor nos dois níveis de energia de soldagem, apesar de cálculos, baseados na equação geral de Rosenthal [9], demonstrarem que a temperatura de pico a 23,5 mm do centro do cordão (extremidade do corpo de prova) foi, para ambos os níveis de corrente, de 25°C, 25°C e 32°C para o aço ao carbono, aço inoxidável e alumínio, respectivamente, isso considerando um rendimento térmico de 43% já referenciado anteriormente. Esta suposição se confirma pela inclinação das curvas, onde para o alumínio o efeito foi maior, seguido pelo aço inoxidável e pelo aço ao carbono.

4. Rendimento Térmico do Processo: Resultado e Discussão

A partir das áreas fundidas encontradas para cada uma das combinações (tipo de material e nível da corrente de soldagem), é possível determinar um raio equivalente para cada uma dessas áreas (raio de um semicírculo de área igual à área da zona fundida para cada caso) e, através do modelo proposto por Rosenthal [9], estimar o rendimento térmico do processo de soldagem para cada condição testada. O valor do rendimento térmico foi estimado considerando a temperatura de pico como a temperatura de fusão do material em questão para uma distância igual ao chamado raio equivalente. A Tabela 8 mostra os valores das áreas médias e dos raios equivalentes determinados para cada condição.

Tabela 8. Áreas médias e respectivos raios equivalentes para cada condição

Material	Corrente (A)	Área média da seção (cm ²)	Raio equivalente (cm)
Aço carbono	150	0,0508	0,180
Aço Inoxidável		0,0473	0,174
Alumínio		0,0364	0,152
Aço carbono	175	0,0677	0,208
Aço Inoxidável		0,0640	0,202
Alumínio		0,0814	0,228

Tabela 9. Desvio padrão da tensão de arco nas condições testadas

Material	Corrente (A)	Desvio padrão da tensão (V)
Aço Carbono	150	10,35
Aço Inoxidável		10,69
Alumínio		8,60
Aço Carbono	175	12,59
Aço Inoxidável		10,93
Alumínio		9,41

Efetuiu-se o cálculo do rendimento térmico para os três materiais nas duas condições de corrente. Para a corrente de 150 A encontrou-se um rendimento térmico de 63,8%, 44,6% e 86,7% e, para a corrente de 175 A, obteve-se 61,4%, 48,3% e 114,2%, sempre respectivamente para aço carbono, aço inoxidável e alumínio. Devido até ao resultado de rendimento acima de 100%, acredita-se que para que essa aproximação seja válida, faz-se necessário que a forma da área fundida se assemelhe a um semicírculo. Como pode se verificar das Figuras 2 e 3, as áreas fundidas nas placas de teste de aço carbono apresentam forma mais próxima à semicircular, o que acarretaria um erro significativo ao cálculo dos rendimentos térmicos para os outros materiais. Dessa forma assume-se como adequado apenas o cálculo do rendimento térmico para o aço carbono (63,8% para a corrente de soldagem 150 A e 61,4% para 175 A), que corresponde ao referenciado na literatura corrente. Vale ressaltar que a estratégia proposta para estimativa do rendimento térmico pode ser limitada devido ao fato de que os modelos de Rosenthal se tornam menos confiáveis para temperaturas mais altas (placa de teste pequena para uma dada energia), devido à simplificação no formato da fonte de calor (neste caso um semicírculo) e aos fenômenos adicionais que ocorrem (fusão e solidificação, por exemplo). Entretanto, nota-se que os rendimentos térmicos calculados variaram de forma diretamente proporcional à condutividade térmica dos materiais estudados. Assim, o calor imposto estaria diretamente relacionado à condutividade térmica dos corpos em contato (neste caso o arco elétrico e a chapa), além de depender da área de contato e da resistência térmica de contato entre o arco e a chapa (fatores não avaliados neste trabalho).

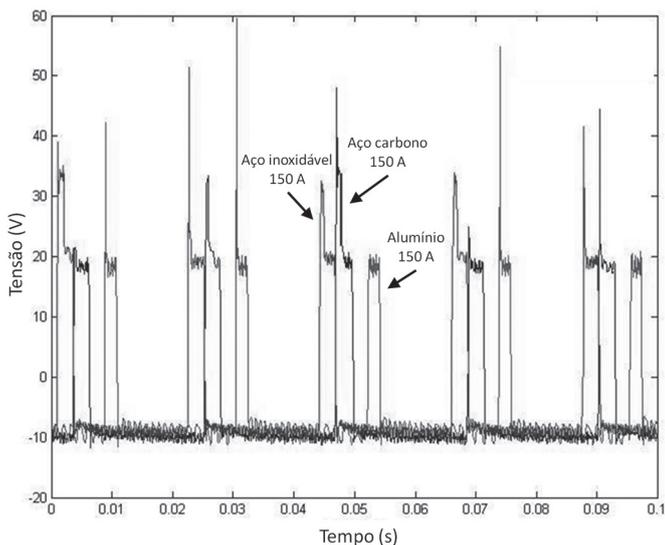


Figura 6. Comportamento dinâmico da tensão na soldagem com 150 A (as curvas para cada material estão desfasadas apenas para facilitar a visualização)

5. Avaliação do Comportamento dos Sinais Elétricos

Para se procurar entender razões para a variação entre os rendimentos brutos de fusão, procurou-se estudar o comportamento dos arcos baseando-se nos oscilogramas de

tensão. As Figuras 6 e 7 apresentam o comportamento dinâmico da tensão dos arcos nos experimentos realizados, tanto para o nível de corrente de 150 A bem como para 175 A. De uma forma geral, com relação às tensões no período em que o eletrodo está no pólo positivo, as tensões são menores para o alumínio, seguido de perto pelo aço inoxidável. Ou seja, na soldagem do aço carbono é requerida uma maior tensão de soldagem para manter o arco aberto.

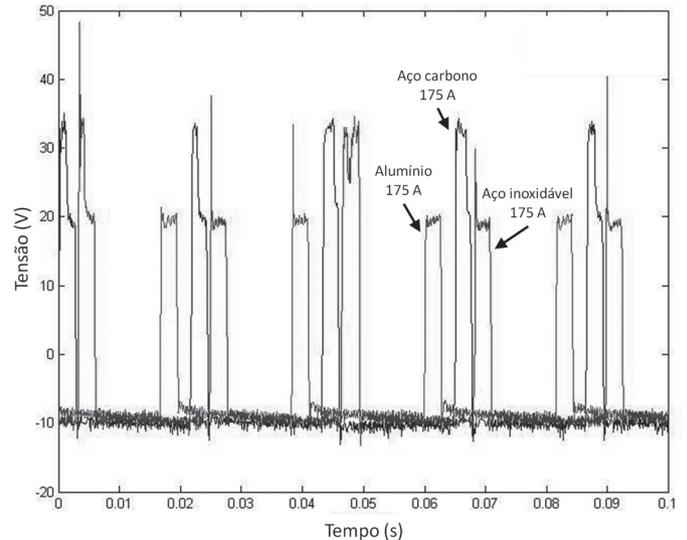


Figura 7. Comportamento dinâmico da tensão na soldagem com 175 A (as curvas para cada material estão desfasadas apenas para facilitar a visualização)

Como tentativa de verificar de forma mais apurada o comportamento de cada material quando submetido a um determinado nível de corrente de soldagem, efetuou-se o cálculo do desvio-padrão do sinal da tensão em toda a sua extensão. É possível supor, mesmo que qualitativamente, que maiores desvios-padrão representam maior dificuldade de acendimento (picos de reignição) e manutenção (intensidade da tensão) do arco. Os resultados para este cálculo são apresentados na Tabela 9 a seguir. Como se pode perceber, os menores desvios-padrão são para o alumínio, com distinção com pouca significância entre aço inoxidável e aço ao carbono. Desta forma, parece não haver nenhuma relação aparente entre a tensão média de arco ou as tensões em cada polaridade (positiva ou negativa) e o rendimento bruto de fusão.

6. Conclusões

A partir dos resultados e discussões apresentados, as conclusões são as seguintes:

- A metodologia empregada para determinar o rendimento de fusão em processo de soldagem a arco sem adição de material mostrou ter sensibilidade suficiente para identificar diferenças quando se solda materiais diferentes;
- O alumínio apresenta o menor rendimento bruto de fusão, ou seja, grande parte do calor imposto pelo processo de soldagem tende apenas a aquecer o material ao invés de fundi-lo. O aço

inoxidável apresenta melhor rendimento, ficando o aço ao carbono em nível intermediário;

- Entretanto, o rendimento bruto de fusão depende não somente das propriedades termodinâmicas do material, mas também da relação dimensão do material de base/parâmetros de soldagem (maior corrente, mais evidente fica o efeito da espessura da chapa, o que faz aumentar o rendimento de fusão);
- Já com relação ao rendimento térmico, fica clara a dificuldade de efetuar seu cálculo partindo-se da metodologia utilizada (modelo de Rosenthal), que requer que a geometria da poça de fusão se assemelhe ao máximo a um semicírculo, o que não acontece tão facilmente.

7. Agradecimentos

À Universidade Federal de Uberlândia, através do Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM), que auxiliou na realização das análises metalográficas, e do Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem (Laprosolda), que forneceu o suporte financeiro e de infraestrutura.

8. Referências Bibliográficas

- [1] FUERSCHBACH, P. W. Energy transfer efficiencies (ETE) for fusion welding processes. Disponível em: <http://smartweld.sourceforge.net/Pdf_docs/Ener_trans_effic.pdf>. Acesso em: 15 setembro 2011.
- [2] PÉPE, N.; EGERLAND, S.; COLEGROVE, P.A.; YAPP, D.; LEONHARTSBERGER, A.; SCOTTI, A. Measuring the process efficiency of controlled gas metal arc welding processes. *Science and Technology of Welding & Joining*, 16(5), p. 412-417, 2011.
- [3] FUERSCHBACH, P. W.; EISLER, G. R. Effect of very high travel speeds on melting efficiency in laser beam welding. *SAE Transactions: Journal of Materials and Manufacturing*, 108, 1999.
- [4] KARKHIN, V. A. et al. Effect of latent heat on thermal efficiency of base metal fusing. In: IIW/CRIST Workshop, 2003, St Petersburg, Russia. p. 318-327.
- [5] MODENESI, P. J. et al. Introdução à metalurgia da soldagem. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFMG, Belo Horizonte, 2004.
- [6] CHRISTENSEN, N. et al. Distribution of temperatures in arc welding. *British Welding Journal*, 12(2), p. 54-75. 1965.
- [7] MATWEB - Material Property Data. Disponível em: <<http://www.matweb.com>>. Acesso em: 28 agosto 2004.
- [8] JOSEPH, A. P. Assessing the effects of GMAW-pulse parameters on arc power and weld heat input. Master of Science Thesis - Graduate School of The Ohio State University, Columbus, 2001.
- [9] ROSENTHAL, D. Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting. *Welding Journal*, May, p. 220s-234-s. 1941.