



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE A ENERGIA GERADA PELO
ARCO E O CALOR ABSORVIDO PELO METAL DE BASE
VARIANDO OS PARÂMETROS DE SOLDAGEM TIG

LUCAS TANNUS MENEZES

Uberlândia-MG

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE A ENERGIA GERADA PELO
ARCO E O CALOR ABSORVIDO PELO METAL DE BASE
VARIANDO OS PARÂMETROS DE SOLDAGEM TIG

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado a Universidade Federal de
Uberlândia (UFU), como requisito para a
obtenção do Diploma de Graduação em
Engenharia Mecânica.

Uberlândia-MG

2018

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Volodymyr Ponomarov
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Douglas Bezerra de Araújo
Universidade Federal de Uberlândia

Me. Diego Costa
Universidade Federal de Uberlândia

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente a Deus, que me proporcionou saúde, sabedoria e discernimento, ao longo de minha vida, e não somente nestes anos como universitários. Ao nosso orientador e seu orientado, Prof. Volodymyr Ponomarov e o doutorando Diego Costa pelo seu apoio e confiança. Aos meus pais, por seu amor e incentivo ímpar. À Universidade Federal de Uberlândia, pela oportunidade de fazer o curso de Engenharia Mecânica. À banca examinadora e aos demais envolvidos no êxito neste trabalho

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a relação entre a energia gerada pelo arco e o calor absorvido pelo metal de base, quando os parâmetros de soldagem TIG sejam variados de maneira que a potência do arco seja mantida a mesma. Desse modo, foi verificado quais são os resultados na geometria do cordão de solda através do estudo macrográfico. Vale ressaltar que apesar de ser impossível realizar todos os processos de soldagem exatamente com o mesmo valor de potência, tentou-se realizar todos os experimentos de forma que sejam o mais semelhante possível e assim ser possível compará-los. Durante este trabalho é demonstrado que o parâmetro que mais afeta as características geométrica do cordão de solda não é a potência do arco, mas sim a corrente.

Palavras chave: Eficiência Térmica; Rendimento Térmico; TIG; Potência do arco; Cordão de solda.

ABSTRACT

The aim of the present work is to evaluate the relationship between the energy generated by the arc and the heat absorbed by the base metal when the TIG welding parameters are varied so that the arc power is maintained the same. With all this said, it was verified what the results in the geometry of the weld bead through the macrographic study. It is noteworthy that although it is impossible to perform all the welding processes exactly with the same power value, we tried to perform all the experiments in a way that is as similar as possible and thus be possible to compare them. During this work, it is demonstrated that the parameter that most affects the geometric characteristics of the weld bead is not the power of the arc, but the current.

Key words: Thermal Efficiency; Thermal Performance; TIG; Arc power; Weld bead.

SUMÁRIO

1. CAPÍTULO I INTRODUÇÃO	8
2. CAPÍTULO II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1 Cálculo da Potência do Arco Elétrico e da Eficiência Térmica.....	10
2.2 Modelos de Transferência de Calor na Soldagem.....	12
2.3 Perdas de Calor Durante o Processo de Soldagem.....	13
2.4 Calorimetria.....	15
3. CAPÍTULO III ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE ENERGIA GERADA PELO ARCO E O CALOR ABSORVIDO PELO METAL BASE	17
3.1 Bancada experimental.....	17
3.2 Equipamentos e Insumos.....	17
3.2.1 Fonte de soldagem.....	17
3.2.2 Tocha TIG.....	18
3.2.3 Mesa de coordenadas X.....	18
3.2.4 Descrição do calorímetro utilizado.....	19
3.2.5 Sistema de Alimentação de Água.....	20
3.2.6 Sistema de aquisição de dados.....	21
3.2.7 Metodologia de Cálculo da Potência Elétrica.....	22
3.2.8 Metodologia de Cálculo da Energia de Soldagem.....	22
3.2.9 Metodologia para Obtenção do Aporte Térmico.....	23
3.2.10 Análise geométrica do cordão.....	24
3.3 Procedimento experimental.....	25
3.4 Análise da influência dos parâmetros sobre a geometria do cordão.....	26
4. CAPÍTULO IV CONCLUSÃO	28
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Na soldagem por fusão a arco elétrico, o fenômeno da transferência de calor para o metal de base é, sem dúvida nenhuma, de imprescindível importância. Ele determina quase todos os parâmetros e propriedades da junta final, mas principalmente os ligados a sua geometria e microestruturas resultantes do metal de junta. Por outro lado, há grandes dificuldades no que diz respeito a previsão destes resultados de soldagem, pois embora o calor gerado pelo arco seja de fácil quantificação, o calor absorvido pelo metal de base ainda é uma incógnita de difícil determinação. Há muitas perdas de calor no caminho “arco – metal base”. A razão entre o calor absorvido pela peça de trabalho e a energia elétrica gerada pelo arco é usada como um indicativo da eficiência térmica do processo. O assunto se complica ainda mais quando tenta-se quantificar o calor efetivamente aproveitado para fundir o metal de base e criar a solda, que é apenas uma parte do absorvido, sem contar o calor perdido através da difusão e depois pela convecção e radiação.

O arco voltaico é caracterizado por complexas reações eletrônicas e químicas, que resultam na geração de grande quantidade de calor e luz, sendo que para maiores correntes geram mais calor e luz. Os processos de soldagem, tais como por Eletrodo Revestido, TIG, MIG/MAG, Arco Submerso, etc., se utilizam do calor produzido para fundir. Mas nem todo o calor gerado pelo arco é aproveitado para estas finalidades, pois parte dele é perdida para meio ambiente na forma de:

- ✓ Aquecimento do eletrodo de tungstênio (no processo TIG);
- ✓ Luz;
- ✓ Som;
- ✓ Outras radiações.

O valor das perdas do calor depende das peculiaridades de cada processo de soldagem a arco e é o que determina a eficiência térmica (η_t) do processo de soldagem, parâmetro de altíssima importância por ser tradicionalmente utilizado nos cálculos de calor imposto e, conseqüentemente, na avaliação da macro e microestrutura do metal de solda.

Para estudos e quantificação do calor gerado pelo arco e absorvido pela peça de trabalho, são utilizados tanto métodos teóricos (analíticos e numéricos - revisão bibliográfica), quanto experimentais (calorimetria). Pode-se dizer que os experimentos calorimétricos são uma abordagem direta, enquanto que os cálculos por meio de modelagem e simulações (revezamento em várias suposições fundamentais inerentes ao modelo) são uma forma indireta de estimar η_t .

Neste trabalho através do uso de um calorímetro de fluxo contínuo de água foi efetuado o cálculo da eficiência térmica no processo TIG exibindo também as etapas do processo junto com a parte teórica.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Cálculo da Potência do Arco Elétrico e da Eficiência Térmica

Para o cálculo da potência elétrica do arco há diferentes métodos e abordagens, Bosworth (1991) defende que há uma diferença de até 30% no valor para o mesmo arco utilizando metodologias distintas. Por outro lado, Gonzales (1997) constatou que no processo de GMAW pulsado, a diferença pode aumentar de acordo com o valor da corrente e tempo de pulso e base. Dependendo do processo de soldagem, um método pode ser apropriado, enquanto outro não é recomendado. Joseph (2001) infere que o método mais adequado é o da potência instantânea. Nascimento *et al.* (2007), através do teorema da esperança concluíram que os métodos mais apropriados são o do cálculo da potência instantânea média e da potência instantânea quadrática média. Devido a possibilidade de uso das duas quando a tensão e corrente são dependentes.

A potência instantânea média $\bar{P}_{inst}$ [W] é calculada através do somatório do produto da corrente e tensão em cada instante, dividido pelo número de pontos adquiridos pelo processo de soldagem, como pode ser visto na Equação 2.1.

$$\bar{P}_{inst} = \frac{\sum_{i=1}^n (U_i \cdot I_i)}{n} \quad (2.1)$$

Onde tensão de soldagem (U_i) é dada em Volt (v) e corrente de soldagem (I_i) em Ampere [A].

Depois de calculado a potência, é possível o cálculo da energia de soldagem através da Equação 2.2, que é a razão entre potência elétrica ($\bar{P}_{inst}$) e a velocidade de deslocamento da tocha (v_s).

$$E_s = \frac{\bar{P}_{inst}}{v_s} \quad (2.2)$$

Onde a energia de soldagem (E_s) em Joule por milímetro (J/mm) e a velocidade de soldagem (v_s) em milímetro por segundo [mm/s].

A utilização das Equações 2.3 e 2.4 para o cálculo da energia de soldagem, são recomendadas pela ASME *Boiler and Pressure Vessel Code, Section IX: Welding and Brazing Qualifications*, item QW409.1 nos casos em que se utiliza o controle sobre a forma de onda do processo durante a soldagem e que a fonte mostre diretamente os valores de energia ou potência do processo. Apresentadas por Melfi (2010) as Equações 2.3 e 2.4 resultam no mesmo valor de energia de soldagem sendo aplicadas com os valores de energia ou potência.

$$E_s = \frac{E_f}{L_c} \quad (2.3)$$

$$E_s = \frac{P_f \cdot t_s}{L_c} \quad (2.4)$$

Onde a energia (E_s) indicada em Joule (J), o comprimento do cordão de solda (L_c) em milímetros (mm), a potência indicada da fonte (P_f) em Watts (W) e o tempo de solda (t_s) em segundos (s).

A eficiência térmica do processo, é um fator de correção da energia do arco, isso se faz necessário pois nem toda energia gerada é entregue até a peça, devido as perdas durante a solda. E este valor é obtido através da Equação 2.5.

$$\eta = \frac{Q_a}{\bar{P}_{inst} \cdot t_s} \quad (2.5)$$

Onde calor que chega até a peça (Q_a) é em Joule (J), potência em Watts (W) e o tempo de solda (t_s) em segundo (s).

Há valores de eficiência térmica para alguns processos de solda que são tabelados por normas, mas estes valores não condizem com a realidade dos experimentos. Isso porque existem variáveis que alteram a quantidade de energia que chega efetivamente à peça e não são possíveis de serem todos computados em uma tabela. A Norma Europeia DIN EN 1011-1:2009 apresenta valores de rendimento fixos para os processos de GTAW e GMAW sendo respectivamente: 60% e 80%.

2.2 – Modelos de Transferência de Calor na Soldagem

O aporte térmico que ocorre durante o processo de soldagem tem sido estudado por diferentes pesquisadores. Rosenthal (1941) um dos primeiros ao estudar a transferência de calor durante os processos de soldagem desenvolveu um modelo teórico apresentando as seguintes considerações:

- As propriedades físicas do material base se mantêm constantes durante o processo de soldagem;
- A fonte de calor é considerada pontual;
- Não ocorre troca de calor por convecção na poça de fusão;
- O fluxo de calor em uma peça com comprimento supostamente infinito é considerado estacionário ou quase-estacionário;
- Perdas de calor para atmosfera são desconsideradas;
- O calor proveniente do metal de adição não é levado em conta nos cálculos.

Através de suas deduções, o autor obteve a Equação 2.6, que demonstra o fluxo de calor durante a soldagem de placas finas, considerando largura infinita e fonte de calor pontual em Joule (J), e com velocidade em metros por segundo (m/s):

$$T - T_0 = \frac{Q_f}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot g} \exp(-\varphi \cdot v \cdot x) K_0(\varphi \cdot v \cdot r) \quad (2.6)$$

Onde T é a temperatura do ponto e T_0 é a temperatura inicial, e os dois valores em Kelvin (K), condutividade do corpo é dado em (W/m·K), espessura em metro, difusidade térmica do corpo em [m²/s], distância do ponto até a origem em metro (m).

Nunes (1983) atualizando as considerações do modelo de Rosenthal, decidiu que há ocorrência de troca de fases e calor por convecção na poça de fusão. Porém, esta nova

abordagem sobre o modelo só era aplicada no caso de soldagem sem deslocamento relativo entre a tocha e peça.

Kou e Le (1984), foram um dos primeiros a desenvolver modelos computadorizados. O modelo desenvolvido foi utilizado no estudo do fluxo de calor na soldagem GTAW de tubos, no caso de três dimensões e estático, foi conseguido resultados de ciclos térmicos e de região de fusão próximos aos que foram obtidos experimentalmente. Contudo, para o modelo transiente os resultados não foram tão satisfatórios.

Gonçalves *et al.* (2006), desenvolveram um modelo utilizando de técnicas inversas que considerava troca de fases, perdas de calor e a variação das propriedades físicas do material com o aumento da temperatura. Através destas considerações tornou-se possível o cálculo do rendimento do processo e a eficiência de fusão a cada instante no processo GTAW.

Mais recentemente, Scotti *et al.*, 2012, propuseram um modelo descritivo mais abrangente para melhor entender os efeitos do fluxo de calor nos processos soldagem. Ele foi dividido em duas partes: a primeira considerando o balanço de energia no arco elétrico e a segunda descrevendo o fluxo de calor no metal base. Com o uso dos modelos desenvolvidos, eles verificaram a imprecisão das simplificações realizadas nos modelos analíticos. No estudo, os autores também propõem o uso do termo “*calor imposto efetivo*”, o qual está relacionado com o calor imposto que realmente afeta a velocidade de resfriamento nas regiões aquecidas do metal base. Este termo seria uma maneira mais adequada de se correlacionar a energia de soldagem com as transformações metalúrgicas que ocorrem durante os processos de soldagem. Conforme o proposto por Scotti *et al.*, 2012, para o mesmo calor imposto obtido através de experimentos com calorimetria, o calor imposto efetivo pode ser diferente.

2.3 – Perdas de Calor Durante o Processo de Soldagem

Sabe-se que uma parte da energia gerada pelo eletrodo é realmente aproveitada para a fusão do metal base durante a soldagem, enquanto uma outra parte é dissipada. Essa parte é cedida ao meio através dos mecanismos de transferência de calor (convecção, condução, radiação), assim como respingos e geração de vapor metálico. Embora, seja um processo complexo, quantificar o calor que é cedido a atmosfera circundante durante abertura e fechamento do arco elétrico, porém não é recomendado negligenciar estas perdas ou então utilizar valores estimados para elas. Pépe (2010) em sua

pesquisa, concluiu que a transferência de calor por condução é o mecanismo mais presente na energia real imposta na peça durante a soldagem a arco. Segundo DuPont e Marder (1995), a maior parte da energia total gerada pelo processo é fornecida pelo arco elétrico e apenas uma pequena parte é fornecida pelo eletrodo. A energia total (energia fornecida pelo eletrodo somada com a do arco) é transferida em parte para a peça, enquanto o restante perde-se para o meio. Os autores observaram que as perdas energéticas são aproximadamente 1% da energia total do arco. Do calor que é entregue na peça, uma parte dela é utilizada na fusão do metal e a outra é transferida por condução aumentando a sua temperatura. O esquema da distribuição de energia proposto por DuPont e Marder (1995), pode ser visto na Figura 2.1.

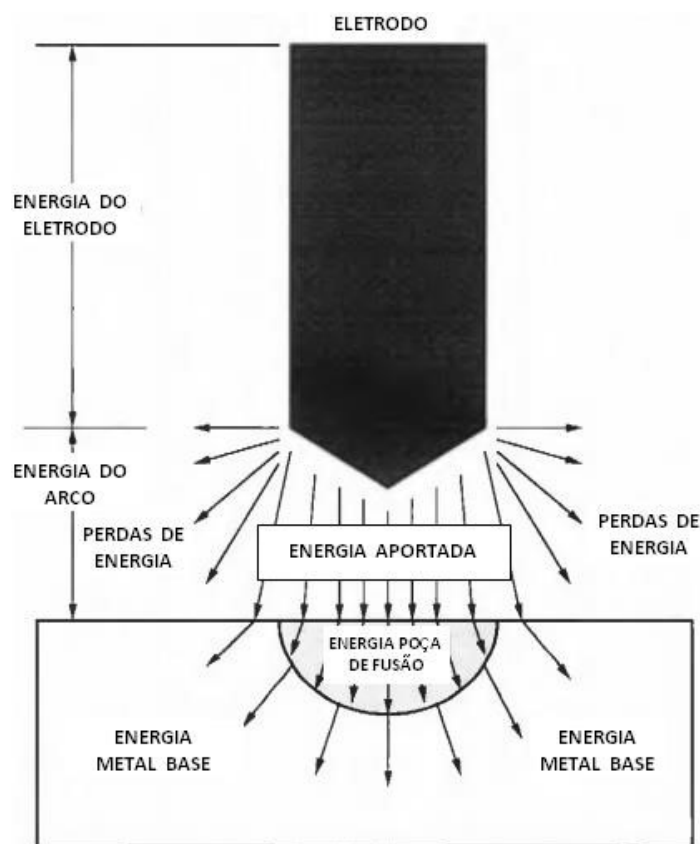


Figura 2.1 – Desenho da distribuição de energia em um processo de soldagem a arco

Os autores analisaram também a quantidade de energia que é utilizada no aquecimento do eletrodo, e concluíram que nos processos onde o eletrodo é consumível (GMAW) o calor gerado pelo aquecimento resistivo do arame é em parte transferido para o metal base. Enquanto, em processos de eletrodo não consumível (GTAW), esta energia que aquece o eletrodo e a tocha é perdida continuamente durante o resfriamento dos mesmos.

Ao compararem a energia imposta e o rendimento térmico no GMAW em passes de solda com penetração total e parcial, Quintino *et al.* (2013), verificaram que há uma redução na energia aportada ao metal base quando a penetração é total. Isso está relacionado com o aumento nas perdas devido a radiação térmica pelo lado da raiz do cordão de solda, e o valor perdido varia de 3% até 12%. Um esquema pode ser visto na Figura 2.2, com os tipos de transferência de calor presentes.

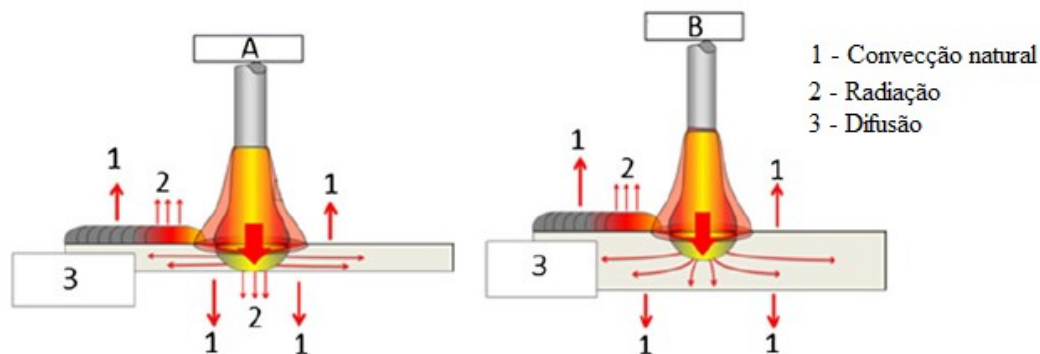


Figura 2.2 – Transferência de calor na peça durante a soldagem. (A) Soldagem GMAW com penetração total, (B) soldagem GMAW com penetração parcial (Quintino *et al.*, 2013)

As perdas entre a energia de soldagem e o calor aportado não são dependentes somente do processo de soldagem, mas dos parâmetros do processo e de características do material base, o que não permite o uso de um único valor de rendimento térmico para um dado processo como valor absoluto (SCOTTI *et al.*, 2012).

2.4 – Calorimetria

Métodos calorimétricos em soldagem são procedimentos experimentais que determinam a parcela da energia de soldagem que foi transferida para a peça devido à soldagem (LISKEVYCH, 2014). As técnicas calorimétricas conhecidas baseiam-se em princípios de funcionamento que podem ser agrupadas segundo a classificação de Dutta *et al.* (1994):

- 1) Resfriamento da placa de teste durante e após a soldagem por fluxo de água (o calor absorvido é determinado com base na variação da temperatura do líquido);
- 2) Imersão da placa de teste em nitrogênio líquido exatamente após a soldagem (o calor absorvido na placa de teste é determinado a partir da massa evaporada do nitrogênio líquido);

3) Realização da soldagem na placa de teste posicionada no fundo de um calorímetro fechado (o calor transferido para a peça é determinado a partir das temperaturas monitoradas nas superfícies da placa de teste durante soldagem e tempo de resfriamento);

Analisando os métodos calorimétricos, observa-se que sempre existem particularidades no princípio de funcionamento de cada um ou na montagem dos mesmos, o que dificulta a execução do ensaio e/ou prejudica a precisão das medições do calor absorvido devido o processo de soldagem.

No caso deste trabalho foi utilizado calorímetro com fluxo de água que mais adiante será explicado seu funcionamento junto com os dados obtidos.

CAPÍTULO III

ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE ENERGIA GERADA PELO ARCO E O CALOR ABSORVIDO PELO METAL BASE

3.1 – Bancada experimental

Os principais componentes da bancada utilizado são:

- Fonte de soldagem;
- Tocha TIG;
- Mesa de coordenada X (para manipulação da tocha de soldagem);
- Sistema de aquisição e condicionamento de sinais (tensão e corrente).

3.2 – Equipamentos e Insumos

3.2.1 – Fonte de soldagem

Para a realização das soldas com o processo TIG, utilizou-se uma fonte transistorizada, chaveada no secundário - IMC Digiplus A7 (Figura 3.1). Com capacidade de corrente de até 450 A. A Tabela 3.1 traz as principais características técnicas deste equipamento.



Figura 3.1 – Fonte de soldagem IMC Digiplus A7

Tabela 3.1 – Características técnicas da IMC Digiplus A7

Corrente nominal	280 A 100% Fator de Trabalho (FT)
Corrente máxima	450 A
Tensão em vazio	68 V
Faixa de pulsação de corrente, Hz	0 – 50
Formato do sinal de corrente	Retangular

3.2.2 – Tocha TIG

Foi utilizada uma tocha TIG automática (modelo TIG 27A-28B, fabricada pela Binzel) refrigerada a água, com capacidade de 500^a e um FT = 100% (Figura 3.2)

3.2.3 – Mesa de coordenadas X

Para realizar os testes de soldagem foi usada uma mesa que permite deslocar a tocha de soldagem no plano horizontal (eixo X), como ilustra a Figura 3.2.

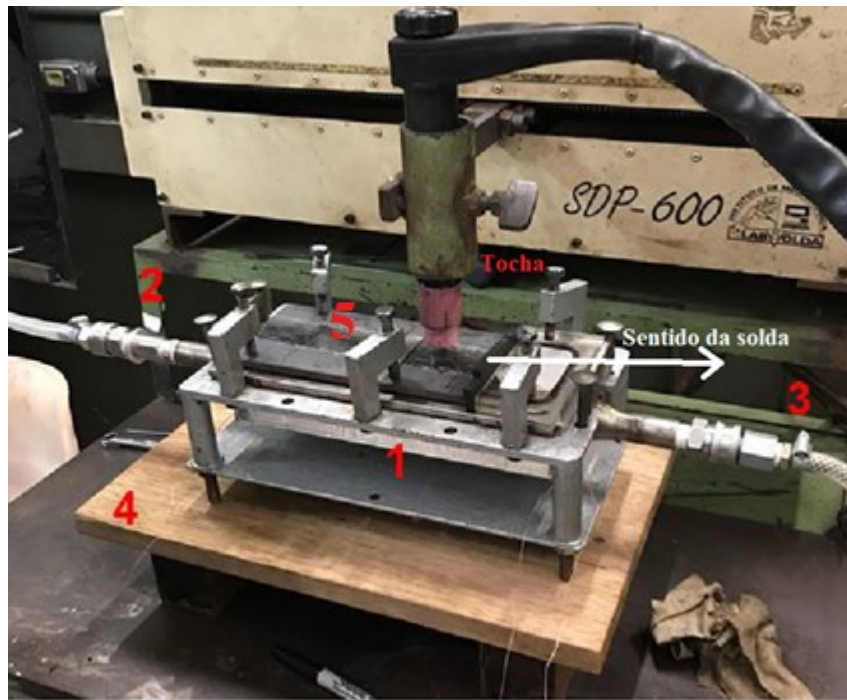


Figura 3.2 – Mesa de coordenada utilizada para realização dos experimentos: 1- Calorímetro, 2- entrada de água vinda do reservatório, 3- Saída de água, 4- Suporte, 5- Placa teste

3.2.4 Descrição do calorímetro utilizado

O calorímetro escolhido para o embasamento do trabalho foi o Calorímetro à Água com fluxo contínuo (Figura 3.3). O projeto do calorímetro é composto por três partes principais, sendo elas o corpo do calorímetro, o sistema de alimentação de água e o sistema de monitoramento dos sinais de saída dos termopares.

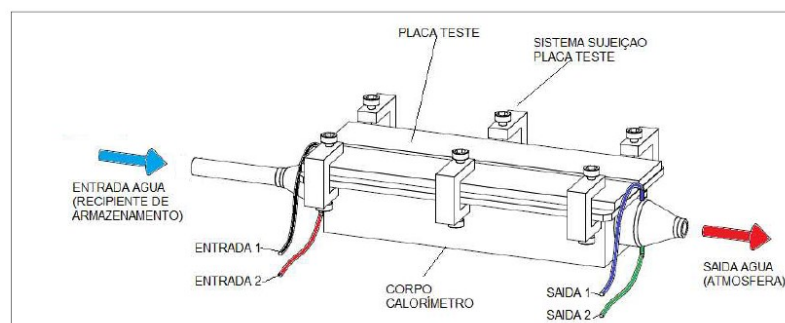


Figura 3.3 – Esquema do calorímetro de fluxo contínuo utilizado (Arevalo, 2011)

Chama-se de corpo do calorímetro a base, o selo de vedação, a placa teste e o sistema de sujeição placa teste. Este corpo contém em seu interior um volume de água que está sendo renovado constantemente devido ao fluxo contínuo, onde se está trocando calor diretamente com a placa teste durante o processo de soldagem e resfriamento da placa teste. O sistema de fixação da placa teste foi realizado através de seis parafusos de 8 mm que são suportados diretamente na base do calorímetro.

3.2.5 Sistema de Alimentação de Água

A alimentação de água do calorímetro de fluxo contínuo deve ser feita de forma constante, evitando flutuações que podem acontecer devido a quedas de pressão e aumento ou redução no fluxo de água na linha de alimentação. Para evitar isto foi projetado um sistema de alimentação para manter sempre o mesmo nível de água (cabeça de pressão) e, portanto, a mesma taxa de alimentação de água para o calorímetro de fluxo contínuo. Na Figura 3.4 pode se observar que o sistema de alimentação é composto pela linha principal de água, recipiente de armazenamento e mangueiras de alimentação e de excesso de água (ladrão).

O recipiente de armazenamento consiste em uma caixa de acrílico de dimensões 25 x 25 x 60 cm com uma entrada de alimentação de água da linha principal, um ponto de saída na parte inferior que alimenta o corpo do calorímetro e um ponto de saída na parte superior que tem como função principal evacuar o excesso de água e manter sempre o mesmo nível (aproximadamente 30 litros). A vazão no ponto de saída que alimenta o calorímetro é controlada por meio de uma válvula de esfera manual de aço inoxidável (com esta pode ser regulada a vazão de água dependendo do grau de abertura).



Figura 3.4 - Recipiente de armazenamento de água com capacidade aproximada de 30 litros

3.2.6 – Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados do calorímetro deve receber os dados de tensão, corrente, temperatura inicial e temperatura final (Figura 3.5).

Para o recebimento de dados de tensão, existe um receptor na tocha de soldagem que capta o sinal elétrico de tensão do arco e o direciona para uma placa condicionadora, que por sua vez é ligada a uma placa de aquisição de dados. Essa última placa envia o sinal para uma conexão USB possibilitando assim a leitura por um micro com o auxílio do programa LabVIEW.

Para o recebimento de dados de corrente, existe um sensor Hall posicionado no cabo terra da máquina de solda. Este sensor envia então um sinal de corrente para a mesma placa condicionadora de sinal mencionada anteriormente, realizando então o mesmo caminho da leitura de sinal da tensão, ou seja, depois segue para uma placa de aquisição de dados e depois para o micro.

Já o monitoramento das temperaturas de entrada e saída foi feito por meio de termopares tipo T através de uma placa de aquisição com interface direta com o micro por meio de conexão USB e monitorada pelo LabVIEW.

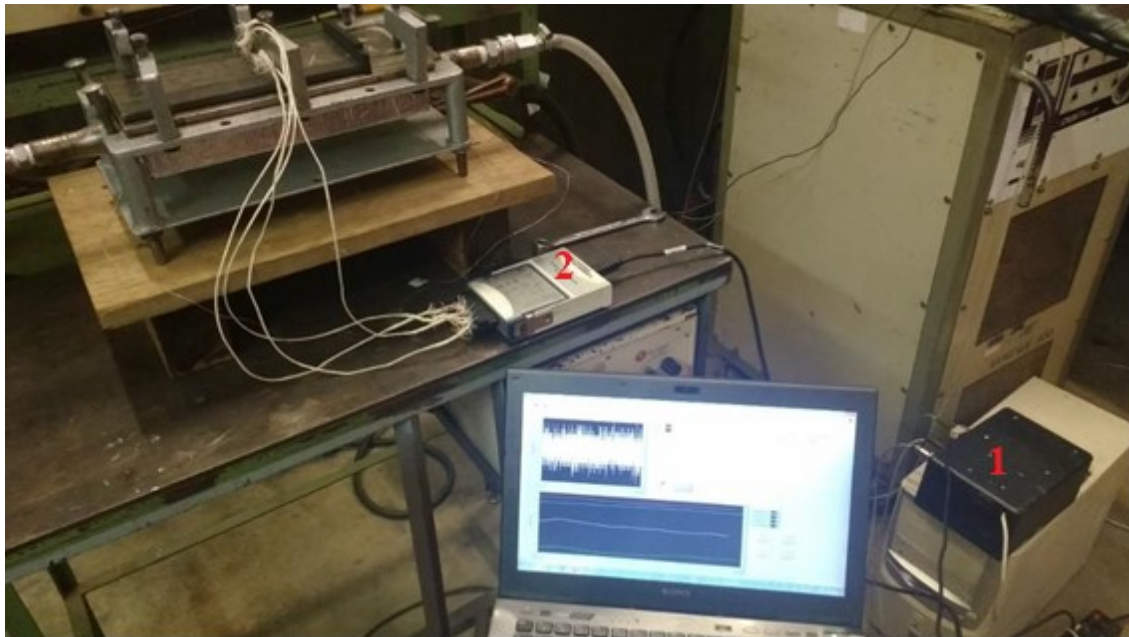


Figura 3.5 – Sistema de aquisição utilizado nos ensaios. 1- Sistema de aquisição de tensão e corrente, 2- Sistema de aquisição dos termopares

3.2.7 Metodologia de Cálculo da Potência Elétrica

Conforme a revisão apresentada no Item 2.1 deste trabalho, um dos métodos que é recomendado para o cálculo da potência elétrica do arco é utilizando a potência instantânea média, uma vez que este método leva em consideração as variações que ocorrem na corrente e na tensão durante o processo de soldagem.

Neste trabalho foi utilizada a Equação 2.1 para obter a potência elétrica do arco a partir dos dados registrados pelo sistema de aquisição de dados durante o monitoramento dos processos de soldagem. A Figura 3.6 apresenta a curva para o processo de soldagem TIG.

Conforme pode ser observado na Figura 3.6, para o cálculo da potência elétrica do arco dos processos de soldagem, considerou-se a região compreendida entre o momento logo após a abertura do arco em que a corrente deixa de ser nula e o anterior ao fechamento do arco, quando a corrente de soldagem retorna ao nível nulo.

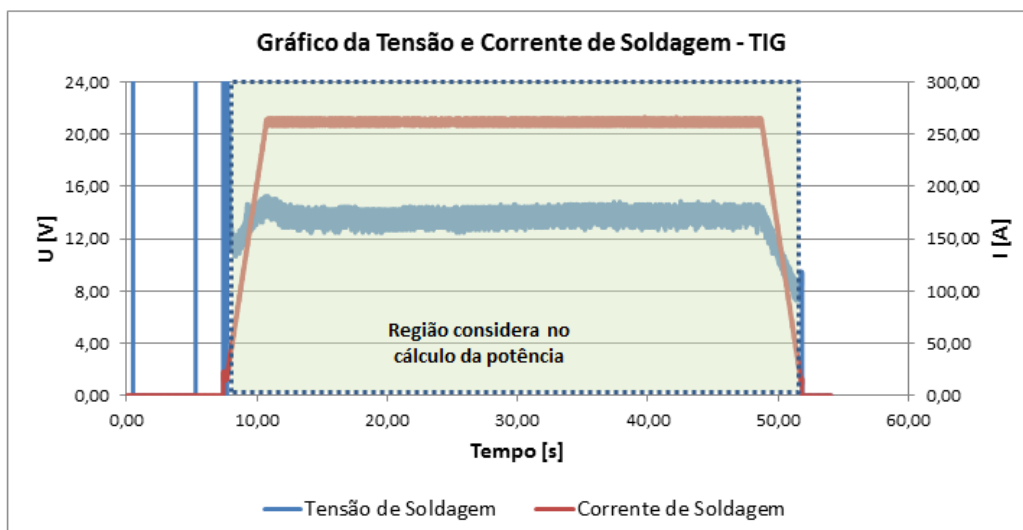


Figura 3.6 – Curvas típicas de tensão e corrente de soldagem para o processo de soldagem TIG. Em destaque a região utilizada no cálculo da potência instantânea média.

3.2.8 – Metodologia de Cálculo da Energia de Soldagem

A energia de soldagem envolvida nos processos analisados neste trabalho foi calculada conforme a Equação 2.2. Utilizou-se a potência elétrica, calculada conforme as considerações do item anterior, e a velocidade de soldagem regulada no equipamento de soldagem durante os experimentos.

3.2.9 – Metodologia para Obtenção do Aporte Térmico

O aporte térmico foi obtido com o uso dos princípios de calorimetria. Para o calorímetro a energia entregue ao corpo de prova pode ser obtida com a Equação 3.1.

$$Q_a = \int_0^t m \cdot c_p \cdot (T_s - T_e) \cdot dt \quad (3.1)$$

Onde m é a vazão mássica de água que passa pelo calorímetro, dada em kg/s, c_p é o calor específico da água em J/kg·K, e $T_s - T_e$ são as temperaturas adquiridas pelo calorímetro em Kelvin, e t é o tempo total da aquisição de dados, em s.

O calor específico e a densidade são propriedades tabeladas da água que variam juntamente com a temperatura. Por simplificação, estas propriedades foram

consideradas constantes. A vazão mássica de água foi mantida constante durante a realização dos experimentos. Desse modo a Equação 3.2 fica:

$$Qa = V_{H_2O} \cdot \rho \cdot c_p \int_0^t m \cdot c_p \cdot (T_s - T_e) \cdot dt \quad (3.2)$$

Onde ρ é a massa específica da água em Quilo grama por metro cúbico

A integral da variação de temperatura no intervalo de tempo analisado é equivalente à área sob o gráfico do sinal obtido com o monitoramento da temperatura da água do calorímetro. Espera-se para os experimentos obter um sinal como apresentado na Figura 3.7.

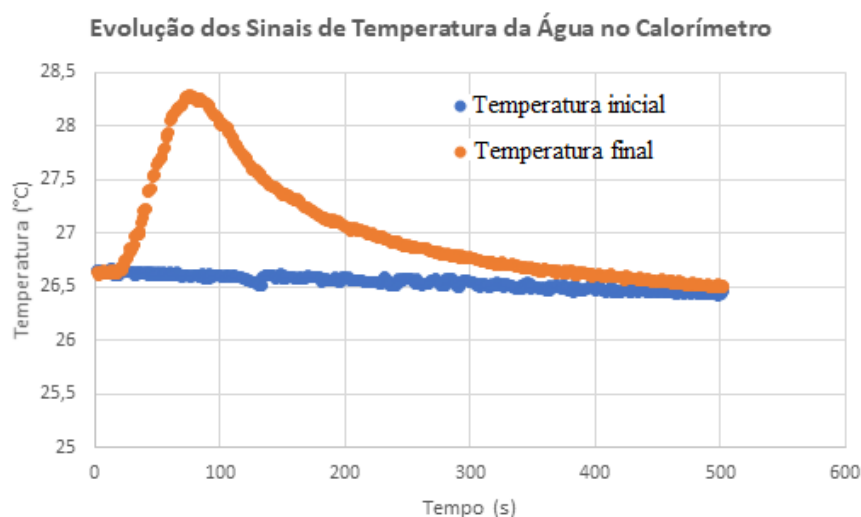


Figura 3.7 – Exemplo da evolução dos sinais de temperatura da água esperada para os ensaios. Em azul é representada a evolução da temperatura da água na entrada do calorímetro, em laranja, a temperatura de saída da água

Percebe-se a existência de duas curvas resultantes. Uma está associada com a medição de temperatura da água no ponto de entrada do calorímetro, que deve ser mantida o mais possível constante, outra, com a medição de temperatura da água no ponto de saída do calorímetro.

3.2.10 – Análise geométrica do cordão

Para a medição das características geométricas dos cordões, cada placa de teste soldada foi cortada transversalmente em três seções. Cada uma das seções retiradas foi preparada metalograficamente, utilizando lixas de granulometria de 100 até 600

mesh. As amostras foram atacadas quimicamente, utilizando-se o reagente Nital 10%, para revelar os contornos da área fundida. Após ataque, as amostras foram fotografadas (com ampliação de 100 x), usando um estereoscópio digital, e analisadas por um programa de tratamento de imagem (Image J). Este software permite realizar a medição de áreas selecionadas em imagens, sendo necessário realizar para cada imagem uma calibração de uma distância conhecida. Para todas as medições realizadas, a calibração foi feita utilizando como base a espessura da chapa.

As características geométricas medidas foram a largura (L), a penetração (P) e área fundida (Af) conforme a Figura 3.8.

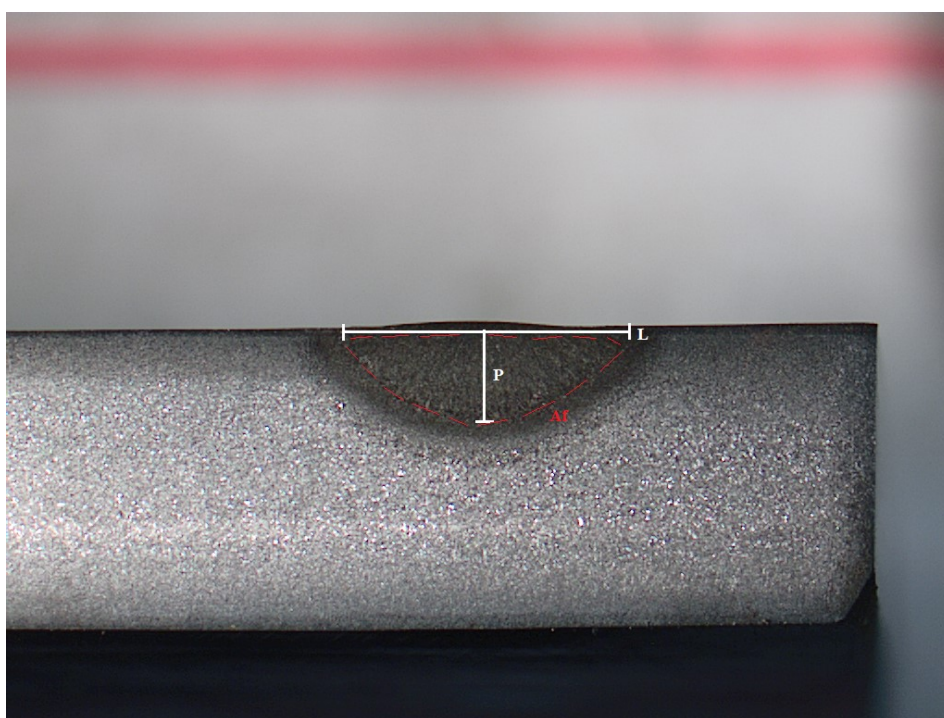


Figura 3.8 – Características geométricas dos cordões a serem medidas para fins Comparativos

3.3 – Procedimento experimental

Todos os testes foram realizados utilizando-se um eletrodo de tungstênio toriado (2%) de 4,0 mm de diâmetro, com distâncias da ponta do eletrodo para peça de 2 mm e 4 mm, com ângulo da afiação do eletrodo 60° e com posição perpendicular da tocha. A velocidade de soldagem foi mantida constante em 30,0 cm/min. O gás de proteção utilizado foi o argônio industrialmente puro (4.0) com vazão de 15 l/min. Os testes foram realizados em simples deposição na posição plana sobre chapas de aço carbono ABNT

1020 de 200 x 100 x 6,3 mm de dimensão, com 2 cordões por placa de teste. A soldagem foi realizada com o eletrodo na polaridade negativa.

Nesta etapa, foram programados e realizados 4 testes. Em todos os testes tentou-se utilizar mesma potência de soldagem (~2500 W), fazendo uma combinação entre a tensão e corrente, de modo que o produto se mantivesse constante. Isto é, para conservação do valor de potência. Para os primeiros 2 testes, escolheu-se um valor de corrente (~200 A), enquanto o valor de tensão (~12 V) foi estabelecido por um comprimento de arco de 2 mm, haja visto sua relação de proporcionalidade. Para os outros 2 testes, resolveu-se duplicar o valor do comprimento de arco e assim diminuir o valor da corrente de soldagem (~180 A) para assim obter valores de potência similares.

A Tabela 3.2 apresenta o planejamento experimental, justamente com os valores monitorados durante as soldagens.

Tabela 3.2 – Valores de parâmetros monitorados e dados obtidos nos experimentos

Ensaio	DEP (mm)	Regulados		Monitorados		Calculados		
		U (V)	I (A)	Potência (W)	T (s)	Es (J)	C_{abs} (J)	η (%)
1	2	12	212	2544	21,33	54101,7	28362,6	52
3		11	213	2490	22,41	54635,3	29189,7	53
2	4	13	180	2472	24,34	57284,7	27996,3	47
4		14	180	2502	21,62	55712,2	27299,1	49

3.4 – Análise da influência dos parâmetros sobre a geometria do cordão

As Figuras 3.6, 3.7 mostram as relações entre as condições experimentais (Tabela 3.2) e os parâmetros geométricos dos cordões produzidos (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 – Valores médios das geometrias dos cordões para cada teste ($V_s = 12,0$ cm/min; $L_a = 4,0$ mm)

Distância eletrodo - peça	Penetração (mm)	Largura (mm)	Área (mm ²)
2 mm	1,3075	6,4075	14,12
4 mm	1,005	6,6325	13,835

Ao comparar os resultados das soldagens com valores de potência utilizando comprimento de arco de 2 mm (~12 V), aos de comprimento de arco de 4 mm (~14 V), percebe-se que quanto menor é a distância eletrodo-peça, maior é o valor da penetração. Esse aumento é percebido também para área fundida. Um dos motivos pode ser que quanto mais próximo o eletrodo se encontra da placa de teste, mais concentrado é o acoplamento arco-peça, o que proporciona menores perdas de calor para áreas circundantes resultando, dessa forma, em um melhor aproveitamento do calor gerado pelo arco. E por isso que a profundidade de penetração e área fundida para o comprimento de arco de 2 mm é maior.

Porém, quando se tem como análise o parâmetro geométrico largura, verifica-se que o afastamento do eletrodo da placa de teste, propicia um arco menos concentrado e certamente com mais perdas de energia para atmosfera. Isso resulta em um maior acoplamento arco-peça, apresentando com isso maior valor de largura e menores valores para penetração e área fundida utilizando comprimento de arco de 4 mm. O aumento do acoplamento arco-peça, conseqüentemente da tensão do processo ocasiona uma queda no rendimento térmico do processo como verificado na Tabela 3.2, resultado este que está em concordância com o trabalho de Haelsig *et. al* (2012).

Agora será discutido qual é o fator realmente decisivo nas características do cordão de solda. Ao analisar-se os parâmetros durante o processo é notório que com a potência de solda sendo mantida a mesma as propriedades do cordão deveriam ser as mesmas, mas isso não acontece. Logo, o produto da corrente e tensão não é tão decisivo nas propriedades como defende a literatura. Ao se levar em conta que existem três zonas catódica, coluna e anódica como pode ser visto na Figura 3.11.

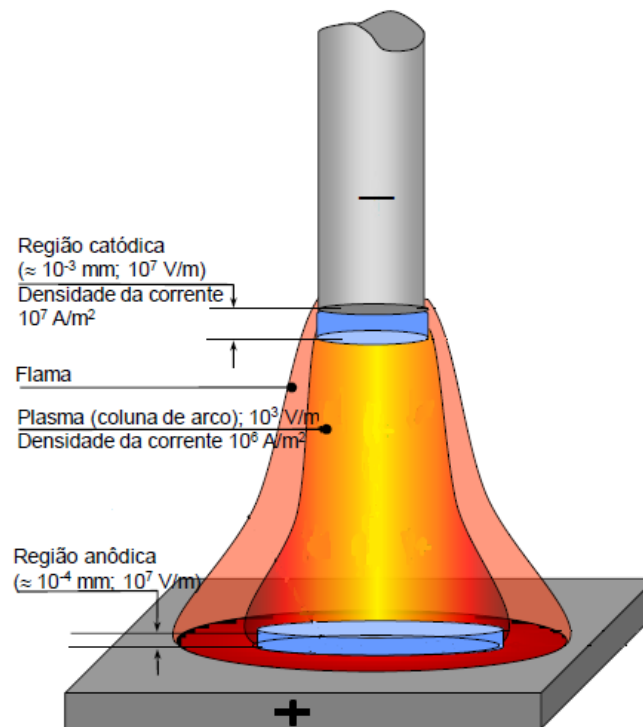


Figura 3.9 - Estrutura do arco elétrico (zonas)

A área catódica (eletrodo) não participa na fusão do material, zona da coluna (arco) até pode influenciar na fusão, mas o que realmente é decisivo na fusão é a área anódica (peça). Ao examinar a área catódica e anódica não dependem do comprimento de arco (tensão total), pois tensão é determinada pelo arco (zona da coluna). Portanto, a tensão não tem influência alguma na quantidade de material fundido. Então pode se concluir que, como a tensão não altera a zona fundida e o aporte de calor, mesmo sendo mantido constante, a zona é alterada. Dessa forma, o parâmetro que realmente importa para área fundida é a corrente que chega até a área anódica. A diferença vista na área fundida é que ao aumentar a distância eletrodo peça, a quantidade de corrente que a área anódica recebe diminui e com isso se perde fusão do material e penetração.

CAPÍTULO IV

CONCLUSÃO

O trabalho apresentado avaliou a relação entre a energia gerada pelo arco e o calor absorvido pelo metal de base, variando os parâmetros de maneira que a potência de arco seja mantida constante.

Foram utilizados o calorímetro de fluxo de água para se obter os valores de aporte térmico e o estereoscópio digital com a finalidade de comparar as medidas dos cordões de solda. Os resultados de eficiência térmica obtidos foram conforme a literatura, portanto foram dados satisfatórios e os testes também considerados confiáveis.

Apesar de manter a potência de arco constante, as características geométricas dos cordões se mostraram distintas, isso deve-se que o produto entre tensão e corrente não é tão decisivo quanto a literatura defende. Logo, ao analisar a estrutura do arco e os parâmetros que realmente afetam a fusão de material, conclui-se que é a corrente que realmente afeta a quantidade de material fundido. Por isso dois cordões de solda mesmo que tenham o mesmo valor de potência de arco, não terão as mesmas características geométricas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

HAELSIG, M. KUSCH, and P. MAYR. Calorimetric analyses of the comprehensive heat flow for gas metal arc welding in the World, 59(2):191{199, mar 2015.

C. MCINTOSH and P. F. MENDEZ. Experimental measurements of fall voltages in gas metal arc welding. Welding Journal, 96(4):121s{132s, 2017}

2012 SCOTTI, AMÉRICO ; REIS, RUHAM PABLO ; LISKEVYCH, OLGA . Modelo descritivo do fluxo de calor em soldagem a arco visando o conceito de calor imposto efetivo. Soldagem e Inspeção (Impresso) , v. 17, p. 166-172, 2012.