



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 mig/mag.

Gustavo Francisco Tomazini

Uberlândia-MG

2018

Avaliação da relação entre a energia gerada pelo arco e o calor absorvido pelo metal de base variando os parâmetros de soldagem mig/mag.

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Núcleo de Trabalho de Conclusão de Curso da Universidade Federal de Uberlândia, como exigência parcial para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Volodymyr Ponomarev

UBERLÂNDIA - MG

2018

Avaliação da relação entre a energia gerada pelo arco e o calor absorvido pelo metal de base variando os parâmetros de soldagem mig/mag.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Douglas Bezerra de Araujo

Prof. Me Diego Costa Correia Silva

UBERLÂNDIA - MG

2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, que me proporcionou saúde e discernimento ao longo de toda minha trajetória. À minha família, que me apoiou e me levantou quando eu caí, sem eles nada disso seria possível. Ao nosso orientador, que depositou confiança e despendeu tempo para que isso pudesse ser concluído com sucesso. À Universidade Federal de Uberlândia, pela oportunidade de concluir minha graduação no curso de Engenharia Mecânica. À banca examinadora e aos demais envolvidos 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 MIG/MAG sejam variados de maneira que a potência do arco seja mantida a mesma. Com isso 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 compara-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; MIG/MAG; 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 MIG/MAG 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; MIG/MAG; Arc power; Weld bead.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1.Cálculo da Potência do Arco Elétrico e da Eficiência Térmica	3
2.2.Modelos de Transferência de Calor na Soldagem	4
2.3Perdas de Calor Durante o Processo de Soldagem.....	6
2.4 Calorimetria.....	8
2.5. Valores de Eficiência Térmica Obtidas em Estudos Anteriores.....	19
3. EQUIPAMENTOS E METODOLOGIA.....	21
3.1.Descrição do calorímetro utilizado	21
3.2.Sistema de Alimentação de Água	21
3.3. Sistema de Aquisição de Dados do Calorímetro	22
3.4. Parâmetros e consumíveis.....	23
3.5. Metodologia de Cálculo da Potência Elétrica.....	24
3.6. Metodologia de Cálculo da Energia de Soldagem	25
3.7. Metodologia para Obtenção do Aporte Térmico.....	25
3.8. Análise geométrica do cordão.....	27
3.9.Fonte de soldagem.....	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
5. CONCLUSÃO.....	33
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34

1. 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 (dependendo do tipo de processo):

- ✓ A alma do eletrodo revestido;
- ✓ O revestimento do eletrodo;
- ✓ O arame-eletrodo;
- ✓ O fluxo;
- ✓ As peças a unir.

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 .

2. 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 à 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.

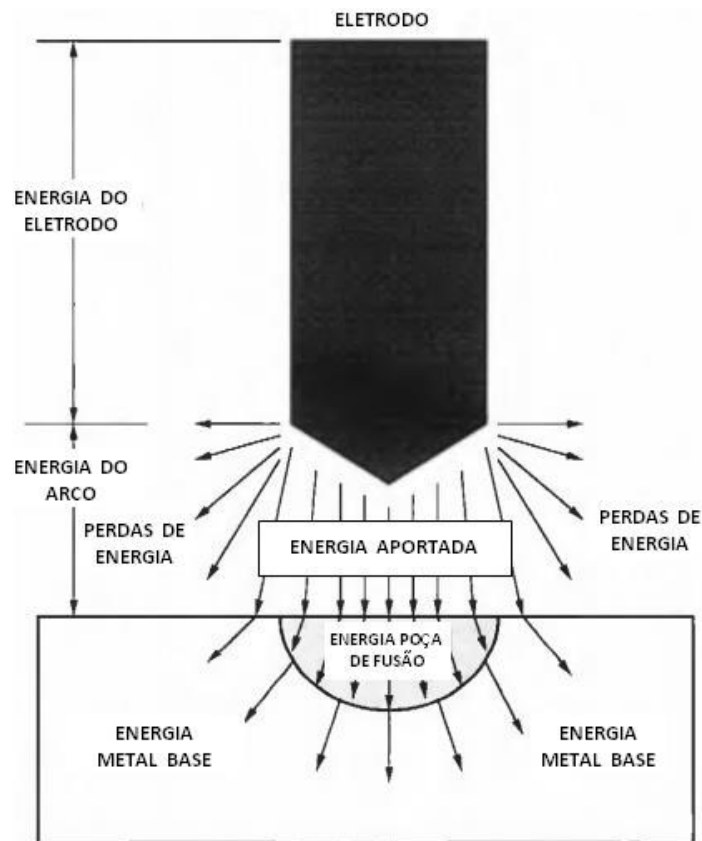


Figura 2.1 – Desenho da distribuição de energia em um processo de soldagem a arco

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.

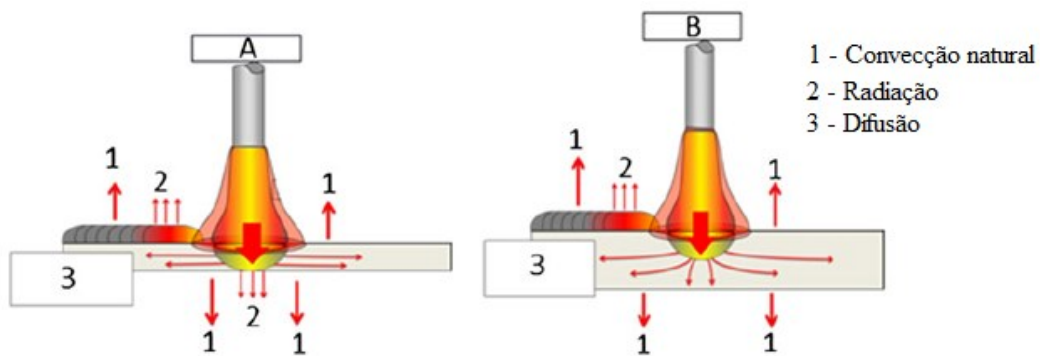


Figura 2.2 – Transferência de calor na peça durante a soldagem. (A) Soldagem GMAW com penetração total, (B) soldagem GMAW com penetração parcial (Quintino *et al.*, 2013)

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.

Um dos métodos experimentais mais utilizados para medição do calor transferido para peça e da eficiência térmica em processos de soldagem é o calorímetro de água. Essers e Walter (1981), foram os primeiros a trabalharem neste tipo de mecanismo onde colocaram uma chapa de aço com uma de suas faces imersa na água, e a outra face onde irá ocorrer a solda exposta ao ar. A água no recipiente era misturada continuamente para que se obtivesse a melhor homogeneização possível por um agitador, a temperatura dentro do calorímetro foi monitorada durante a solda e atingiu o valor de 35°C. Os autores verificaram que houve uma perda de calor pela superfície seca menor que 5%, eficiência térmica média de 65% para GTAW-plasma e de 71% para GTAW convencional. O esquema do mecanismo pode ser visto na Figura 2.3.

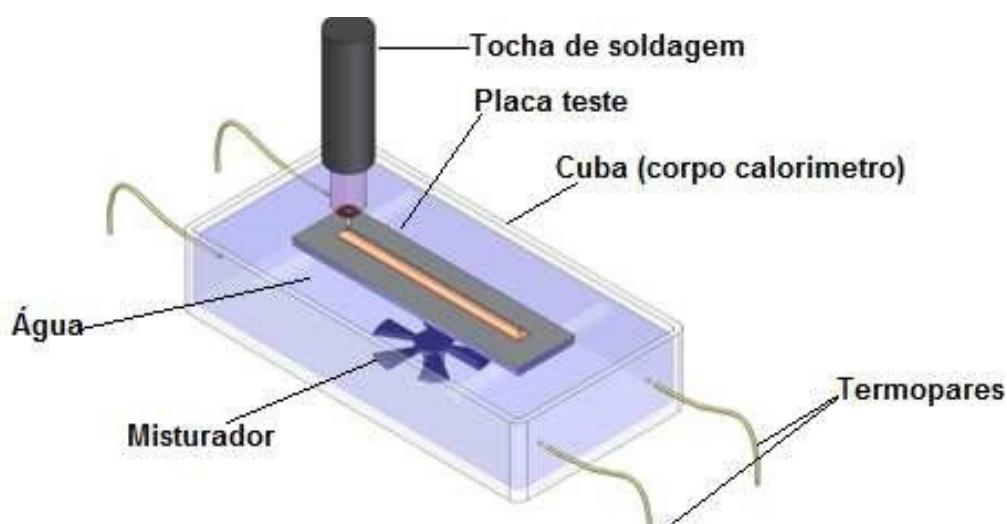


Figura 2.3 - Representação do calorímetro proposto por Essers e Walter (1981)

Por sua vez, Lu e Kou (1989), utilizaram uma derivação desse calorímetro que se baseia no fluxo contínuo de água, que mede a temperatura utilizando termopares na entrada e saída do calorímetro. O fluxo de água fica sempre em contato com a placa pelo lado de baixo e a superfície onde acontece a solda. Os autores verificaram que não houve formação de bolhas resultantes da vaporização da água com este arranjo e obtiveram uma eficiência térmica média de 80% para GTAW de alumínio com transferência globular. E concluíram que 45% do calor é proveniente do arco elétrico, 23% das gotas formadas e 12% da poça de fusão. Esta eficiência foi consideravelmente maior do que a obtida por Essers e Walter, e essa diferença foi atribuída às propriedades do material base utilizado no teste, neste caso aço carbono. O esquema do calorímetro está representado na Figura 2.4.

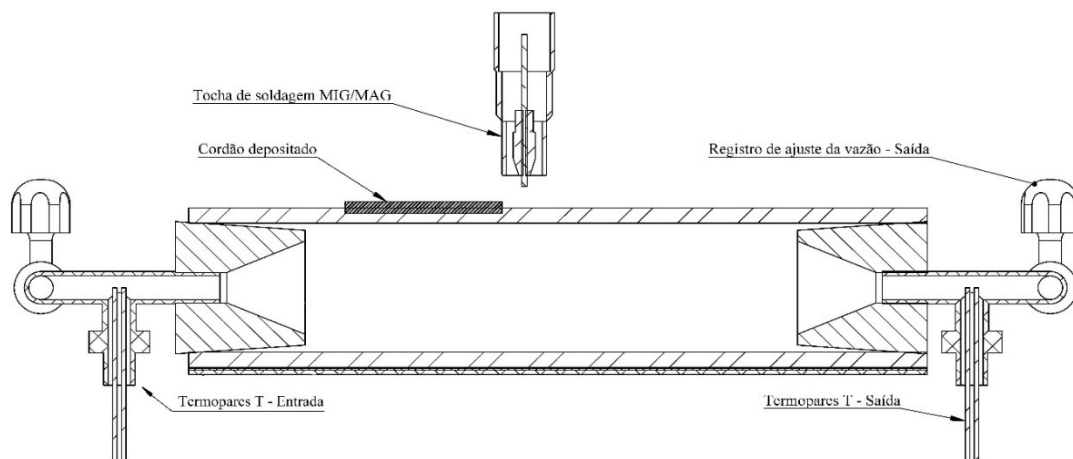


Figura 2.4 – Calorímetro com fluxo contínuo de água (Sgarbi, 2013)

Mais uma versão do calorímetro de fluxo contínuo foi proposta por Zijp (1990) e utilizada mais tarde também por Hiraoka *et. al.* (1998) para análise do calor imposto para processo GTAW sem movimentação da tocha de soldagem, aparelhagem que pode ser vista na Figura 2.5. Nesta configuração do calorímetro, o jato de água atinge a placa de teste exatamente no ponto oposto da atuação do arco. O monitoramento de temperatura na entrada e saída do calorímetro é feito continuamente por meio de termoresistores e termômetros. Além de estudar o calor imposto por processo de soldagem e respectivo rendimento térmico do processo, também foi analisada a troca de calor que acontece no eletrodo (catodo ou anodo) por meio de um sistema de resfriamento da tocha de soldagem.

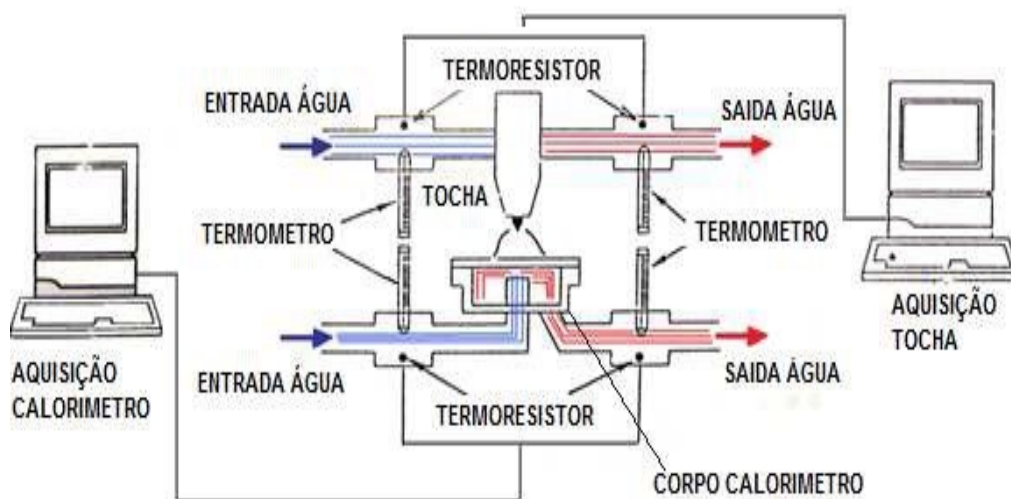


Figura 2.5 - Apresentação esquemática do calorímetro de fluxo contínuo versão Zijp (1990) e Hiraoka *et. al.* (1998)

Bosworth (1991) continuando com a utilização de calorímetros de funcionamento com água, instrumentou um que é composto por um recipiente isolado do ambiente externo, preenchido com água e instalado com termopares para monitoramento da temperatura interna. Para verificação do calor aportado ao corpo de prova durante a soldagem, o autor padronizou os tempos de soldagem e de intervalo entre o término da solda e a imersão do corpo de prova no recipiente com água. Devido às incertezas e a perda de calor durante a transferência da chapa metálica soldada, foi atribuída uma incerteza total de 5% no cálculo da eficiência térmica. Mantendo os parâmetros de soldagem constantes, o autor observou que uma quantidade maior de calor é entregue ao corpo de prova se utilizado o processo de soldagem MIG/MAG goticular, quando comparado ao processo MIG/MAG pulsado, exceto quando a transferência metálica se dá por curto-circuito. O autor também verificou que a velocidade de alimentação do arame é a variável de maior impacto na eficiência térmica do processo. Neste estudo foi obtida uma eficiência térmica de 83% a 85% para o processo de soldagem MIG/MAG convencional e na faixa de 82% a 83% para o processo MIG/MAG pulsado.

Com uma proposta de calorímetro que também utiliza água, mas diferente dos autores apresentados anteriormente. Haelsig *et al.* (2012) ao posicionar a placa de teste com certo ângulo no recipiente calorimétrico termicamente isolado permitindo assim trabalhar com uma faixa ampla de espessuras (1 – 15 mm) e também a utilização de vários processos de soldagens para medir a eficiência térmica, como pode ser visto na Figura 2.6. Essa colocação garante que as deformações (especialmente, das chapas finas) não influenciam nas medições. A tocha de soldagem é movimentada por um sistema robótico com velocidade constante, mantendo a mesma distância do topo da placa de teste. Simultaneamente com o deslocamento da tocha, o nível de água no recipiente calorimétrico é aumentado constantemente, eliminando assim a distância entre o local de imposição da energia de soldagem e o nível de água. O objetivo dessa abordagem é garantir que o calor transferido para a peça permaneça no ambiente do calorímetro, assim como que não exista algum filme de ar prejudicando as medições. Para obter uma distribuição homogênea da temperatura dentro do recipiente, a água é constantemente circulada por uma bomba. A temperatura é monitorada constantemente do início ao final de soldagem por termopares de alta sensibilidade posicionados dentro do recipiente calorimétrico.

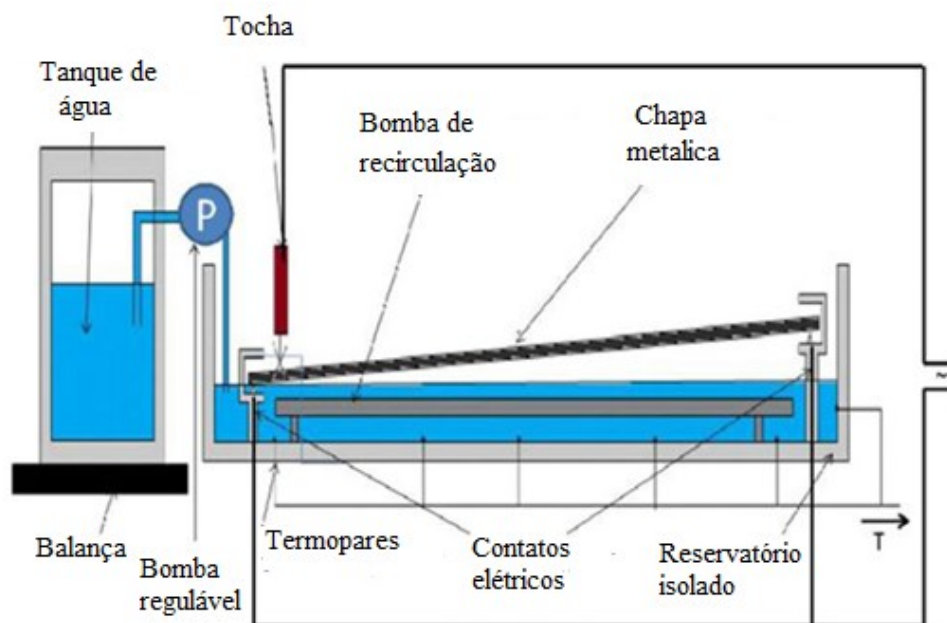


Figura 2.6 – Calorímetro para avaliação do rendimento térmico proposto por Haelsig *et al.*, 2012

Outro tipo de calorímetro utilizado para a medição do calor imposto nos processos de soldagem é o calorímetro de efeito Seebeck. Esse método é frequentemente usado para determinar as características térmicas do material e se baseia na utilização da “camada gradiente”. Quando acontece a condução de calor através de um material, uma diferença de temperaturas pode ser encontrada entre as duas superfícies (através da fixação de um par de termômetros elétricos posicionados em cada lado da camada). A taxa de transferência de calor neste caso pode ser encontrada através da Equação 2.6 (BENZINGER, 1949):

$$V_q = q \frac{D}{\lambda} \quad \text{Eq. 2.6}$$

Onde, V_q é a diferença de temperatura entre as superfícies da camada ($^{\circ}\text{C}$), q é o fluxo de calor (cal/s); D é a espessura de camada (cm) e λ é a condutividade térmica específica do material da camada ($\text{cal/s}\cdot\text{cm}^{\circ}\text{C}$).

O princípio do efeito Seebeck foi usado no calorímetro apresentado por Giedt *et. al.* (1989), para analisar os efeitos da variação dos parâmetros de soldagem no rendimento térmico do processo GTAW, e pode ser visto na Figura 2.7. A medição é realizada com um circuito de termopares colocados nas superfícies interna e externa da camada. Uma termopilha é formada por uma série desses circuitos, multiplicando a saída termelétrica do sistema. Essa combinação das termopilhas e camadas gradientes formam um medidor de taxa de calor, baseado no efeito termelétrico Seebeck.

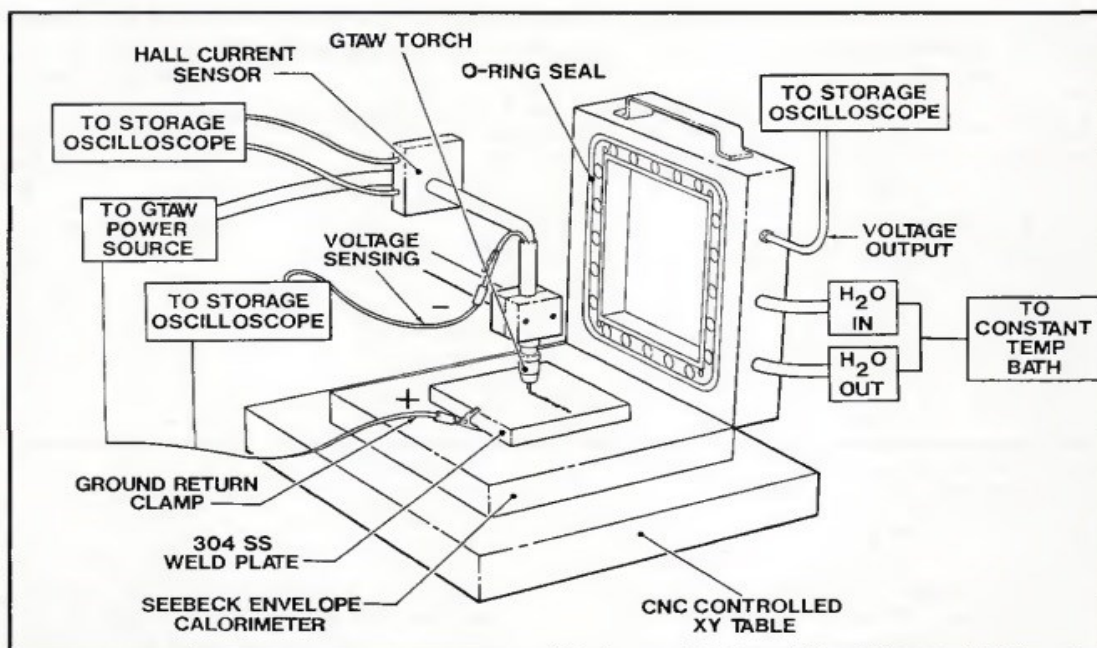


Figura 2.7 – Apresentação esquemática do calorímetro baseado no efeito Seebeck usado por Giedt et al. (1989)

DuPont e Marder, 1995, utilizaram um calorímetro baseado no princípio termoelétrico de Seebeck semelhante ao desenvolvido por Giedt et al., 1989, conforme pode ser observado na Figura 2.8. O aparato consiste em uma junção termocondutora que fica sujeita a um gradiente de temperatura. Um lado da junção é constantemente resfriado com água, enquanto o outro lado fica em contato direto com o corpo de prova a ser soldado. Este gradiente de temperatura é medido com um par de termopares, sendo cada um posicionado em um dos lados da junção. O sinal de tensão elétrica obtido é multiplicado por uma constante de calibração (função da condutividade térmica específica, espessura da junção condutora e do tipo de termopar utilizado), fornecendo o valor de energia que é entregue à peça durante o processo de soldagem. Os autores obtiveram uma eficiência térmica média de 67% para o processo de soldagem TIG e de 84% para o processo MIG/MAG. Estes valores concordaram com os obtidos no estudo de Giedt et al., 1989.

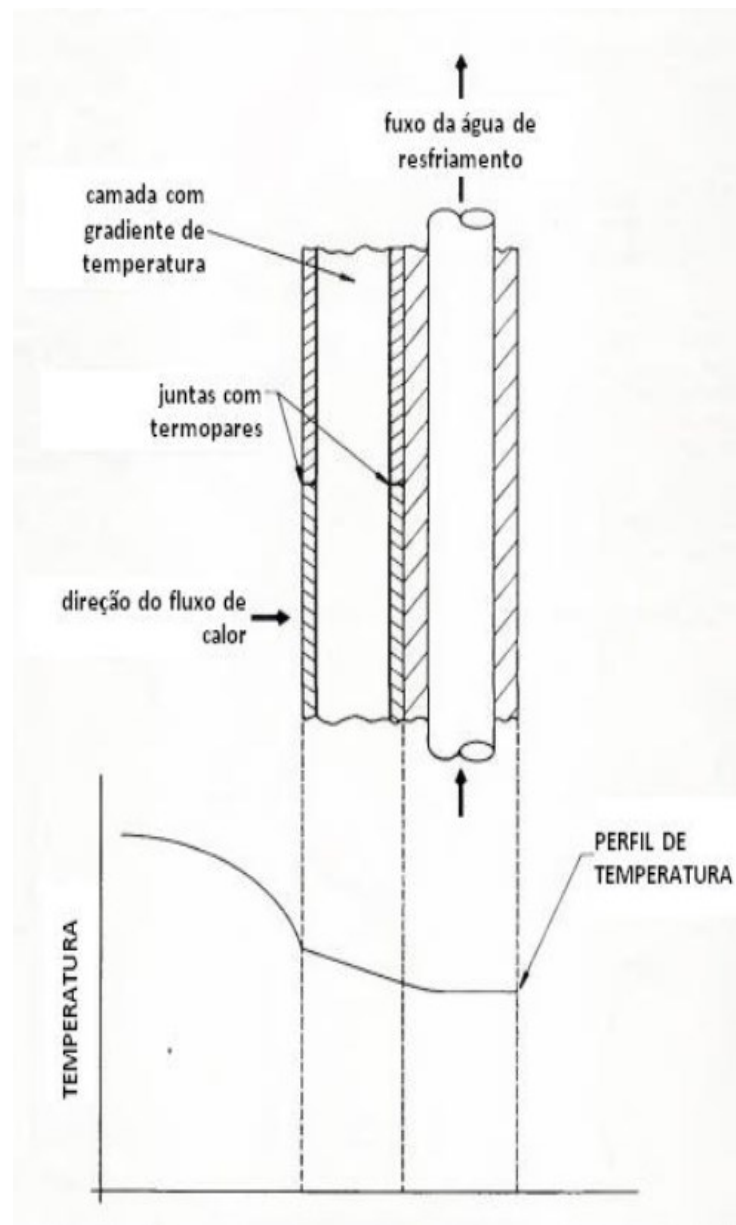


Figura 2.8 – Princípio operacional do calorímetro (Adaptado de DuPont e Marder, 1995)

Um calorímetro com as mesmas características construtivas foi utilizado por Fuerschbach e Knorovsky (1991), que observaram um rendimento médio do arco de 80% tanto para o processo MIG/MAG convencional quanto para o MIG/MAG pulsado.

Utilizando um calorímetro de caixa fechada, Cantin e Francis, 2005, investigaram a eficiência térmica na soldagem MIG/MAG em alumínio. O equipamento utilizado consiste em uma caixa com uma base de cerâmica sobre a qual foi apoiado o bloco de alumínio a ser soldado. O espaço restante da caixa foi preenchido com vermiculita, visando reduzir a perda de calor para o ambiente vizinho. Foram posicionados oito termopares no bloco de alumínio para monitoramento do perfil de temperatura durante a soldagem. O esquema de montagem do calorímetro pode ser observado na Figura 2.9.

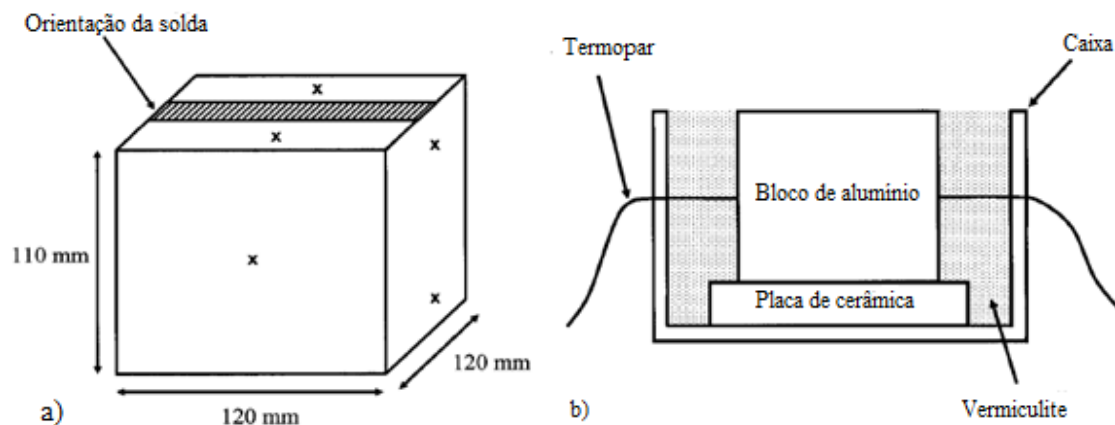


Figura 2.9 – Calorímetro de caixa fechada. (a) Montagem da caixa mostrando localização dos termopares (b) montagem do bloco na caixa (Adaptado de Cantin e Francis, 2005)

Os autores verificaram que utilizando polaridade direta (eletrodo negativo), a eficiência térmica variou entre 46% e 89% e com polaridade inversa (eletrodo positivo) a faixa foi de 52% a 60%. Em concordância com os estudos de Zijp e Den, 1990 e Hiraoka et al., 1998, eles observaram que o gás de proteção tem grande efeito na eficiência térmica do processo de soldagem, sendo os maiores valores obtidos com uma mistura mais rica de Hélio (25% Ar / 75% He).

O projeto do calorímetro similar ao do trabalho de Cantin e Francis (2005) foi apresentado por Pépe *et al.* (2011) e pode ser observado na Figura 2.10. Este equipamento consiste de três partes principais, caixa, apoio para placa de teste e tampa. A caixa foi construída de poliuretano recoberta internamente com lamina de alumínio que tem como função refletir a energia por radiação na parte interna do calorímetro. O apoio da placa teste foi feito de cobre para, primeiramente, para fornecer uma junção mais homogeneia com a placa de teste, e, em seguida, para monitorar a variação de temperatura antes, durante e após do processo de soldagem por meio de três termopares localizados no começo, meio e final do apoio de cobre. A tampa tem como função principal cobrir a parte interna do calorímetro para eliminar as perdas de calor para o ambiente durante a soldagem e é movimentada junto com a tocha de soldagem, fechando o calorímetro de forma gradual.

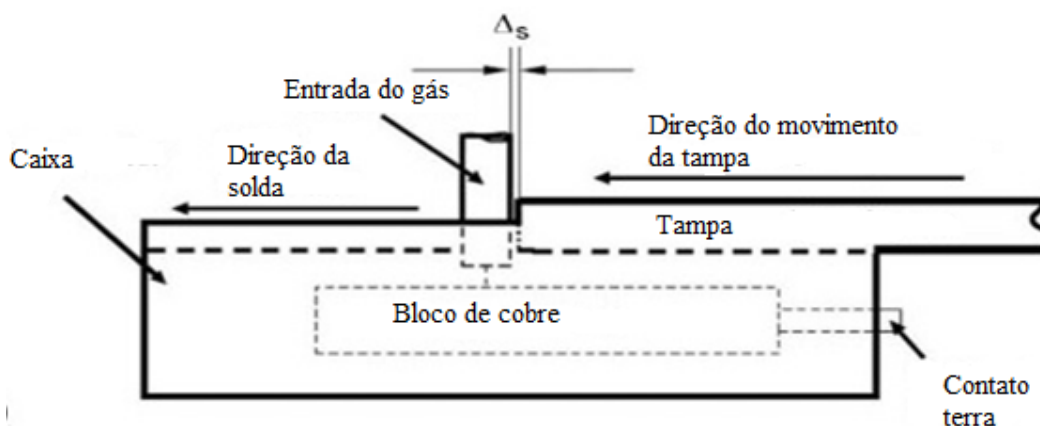


Figura 2.10 – Apresentação do calorímetro de caixa isolada junto com a movimentação da tocha de soldagem e o fechamento gradual da tampa do calorímetro (PEPE, *et al.* 2011)

Os valores de eficiência térmica encontrada pelos autores utilizando MIG/MAG pulsado e CMT – Fronius neste método giraram em torno de 80%.

Outro método em potencial que utiliza água para medir a entrada de calor bruto (ou seja, a quantidade total de calor que é entregue à superfície da placa por um arco de soldagem e transferido para a água corrente sem perda para o ambiente), mas com aplicação limitada aos processos de soldagem por arco autógeno (TIG e plasma autógenos) é o calorímetro de ânodo estacionário resfriado a água, proposto por Hurtig *et al.* (2016). Neste calorímetro, representado na Figura 2.11, a placa de teste recebe calor do ânodo estacionário (tocha) e cedendo calor para o fluxo de água e também para o ambiente, atingindo o equilíbrio térmico em poucos segundos.

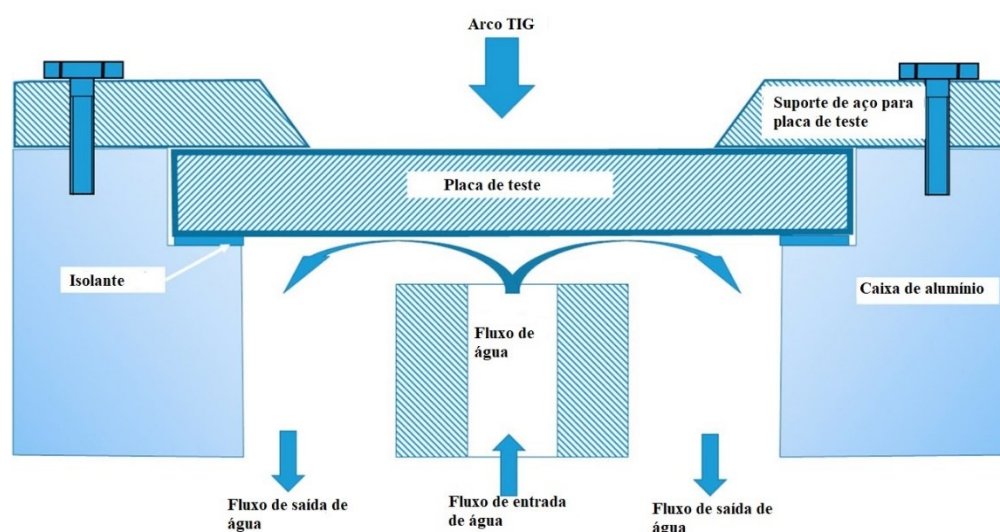


Figura 2.11 – Calorímetro de ânodo estacionário resfriado a água, proposto por Hurtig *et al.* (2016)

Enquanto não houver calor significativo conduzido através das laterais da placa (pequena área), a maior parte do calor introduzido na placa é forçada a ser transferida para a água que flui através da superfície da raiz da placa, como ilustrado na Figura 2.12.

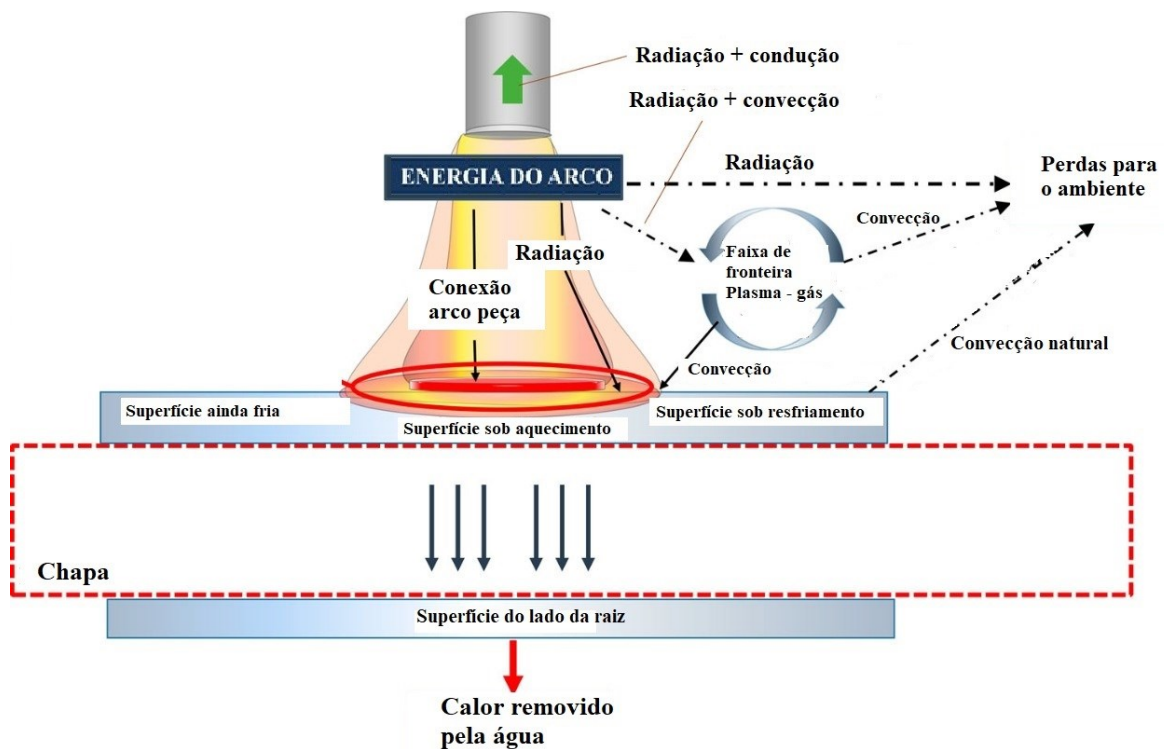


Figura 2.12 - Um equilíbrio de energia do arco (tensão $\times$ corrente $\times$ tempo) e distribuição de calor em um calorímetro de ânodo estacionário refrigerado a água (Hurtig *et al.*, 2016)

Pesquisadores têm substituído a água por nitrogênio líquido para servir de mecanismo de resfriamento (KENNEY *et al.* 1998; HARWIG, 2001 JOSEPH, 2003; HUS e SOLTIS, 2003; SCOTTI, 2008; PÉPE, 2010; ARÉVALO 2011; LISKEVYCH, 2014) todos estes pesquisadores utilizaram calorímetros com nitrogênio líquido para se obter o aporte térmico em processos de soldagem. Uma das vantagens de se utilizar nitrogênio líquido é a boa repetitividade dos ensaios, porém tem-se um custo mais elevado que os calorímetros que utilizam água ou que são baseados no efeito de Seebeck.

Utilizando um recipiente Dewar (um recipiente criogênico) posicionado sobre uma balança, Kenney *et al.* (1998), pôde calcular a eficiência térmica do processo GMAW. A eficiência é calculada através da pesagem logo após o processo de solda ser feita na peça, que é colocada no recipiente Dewar preenchido com nitrogênio líquido, e uma balança mede a quantidade de nitrogênio que evaporou. Com isso os autores obtiveram uma eficiência térmica entre 69% e 82% para GMAW pulsado e para GMAW CMT (do inglês Cold Metal Transfer) de 80% até 93%. O passo a passo do processo pode ser visto na Figura 2.13.

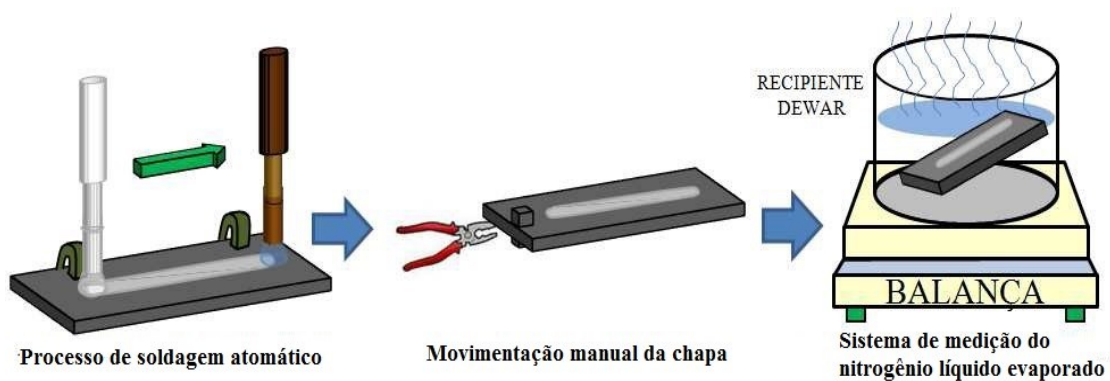


Figura 2.13 – Procedimento da utilização do calorímetro de N₂L para avaliar aporte térmico Arévalo (2011)

Arévalo (2011), aprimorou o calorímetro dos autores Kenney *et al.* (1998) ao diminuir a chance de erros ao transportar a peça que já passou pelo processo até o recipiente Dewar. O transporte que era feito manualmente podia ser fonte de erro ao perder energia durante a movimentação, para isso Arévalo (2011) automatizou este processo e também padronizou a medição da massa evaporada de N₂L. O equipamento possui um sistema pneumático para fixação e movimentação da peça a ser soldada, também um sistema para deslocamento da tocha de soldagem e de um sistema para a aquisição de dados do processo de soldagem e da massa evaporada de nitrogênio líquido, conforme pode ser observado na Figura 2.14.



Figura 2.14 – Calorímetro de nitrogênio líquido proposto por Arévalo (2011)

Analisando os resultados o autor pode verificar que a bancada apresentou boa repetitividade com diferença de no máximo 3% entre os dados obtidos, e foi obtido uma eficiência térmica de 78,6% para GMAW curto-circuito convencional, 73,6% para GMAW com transferência metálica goticular e 76,1% para GMAW com curto-circuito controlado.

Utilizando dos princípios de calorimetria, mas não analisando a eficiência térmica Soderstrom *et al.* (2011), construíram um dispositivo que avalia o calor resultante do metal de adição no processo GMAW. Observaram que de 20% até 30% da energia total de soldagem é derivada pelas gotas do eletrodo para as poças de fusão, e também verificaram que da mudança de transferência globular para a spray há uma redução na temperatura da gota.

2.5 – Valores de Eficiência Térmica Obtidas em Estudos Anteriores

Para o uso como referência para os experimentos executados, foram usados valores de rendimento térmico obtidos por outros autores. É apresentado na Tabela 2.1 as eficiências térmicas para o processo de soldagem GMAW.

Tabela 2.1 – Valores de eficiência do arco para o processo de soldagem GMAW

Autor(es) e princípio do calorímetro	Gás de Proteção	U [V]	I [A]	v_a [m/mm]	v_s [mm/s]	η
Essers e Walters (1981) Banho de água continuamente agitada	93% Ar / 7% CO ₂	—	275	—	—	71%
Bosworth (1991) Imersão do corpo de prova em recipiente com água	82% Ar / 18% CO ₂	35,4	292	9,9	5	76%
	82% Ar / 18% CO ₂	28,3	148	4	5	79%
	95% Ar / 5% CO ₂	27,5	243	9,9	5	78%
	95% Ar / 5% CO ₂	20,3	148	4	5	80%
	75% Ar / 25% CO ₂	34,6	307	9,9	5	83%
	75% Ar / 25% CO ₂	16,8	170	5,9	5	86%
Lu e Kou (1989) Fluxo de água contínuo	100% Ar	19,4	78	2,5	10,2	83%
	100% Ar	22,6	128	3	10,2	81%
	100% Ar	27,8	176	4	10,2	81%
	100% Ar	28,2	251	5,8	10,2	80%
Arévalo (2011) Fluxo contínuo de água	75% Ar / 25% CO ₂	19	122	4	5	71%
	75% Ar / 25% CO ₃	29	287	8,5	5	67%
Giedt <i>et al.</i> (1989) Princípio de Seebeck	100% Ar	27	230	—	15	84%
DuPont e Marder (1995) Princípio de Seebeck	100% Ar	27	230	7,2	15	87%
	100% Ar	35	375	7,2	15	85%
Arévalo (2011) Imersão do corpo de prova em recipiente Dewar com N ₂ L	75% Ar / 25% CO ₂	19	128	3	6,7	77%
	75% Ar / 25% CO ₂	19	122	4	5	82%
	75% Ar / 25% CO ₂	29	286	8,5	5	79%

Como pode ser visto na tabela a eficiência para um mesmo experimento ao utilizar processos distintos os valores são bem diferentes. Stenbacka *et al.* (2012), fizeram um levantamento dos resultados obtidos no processo de GMAW, pode ser visto na Figura 2.15:

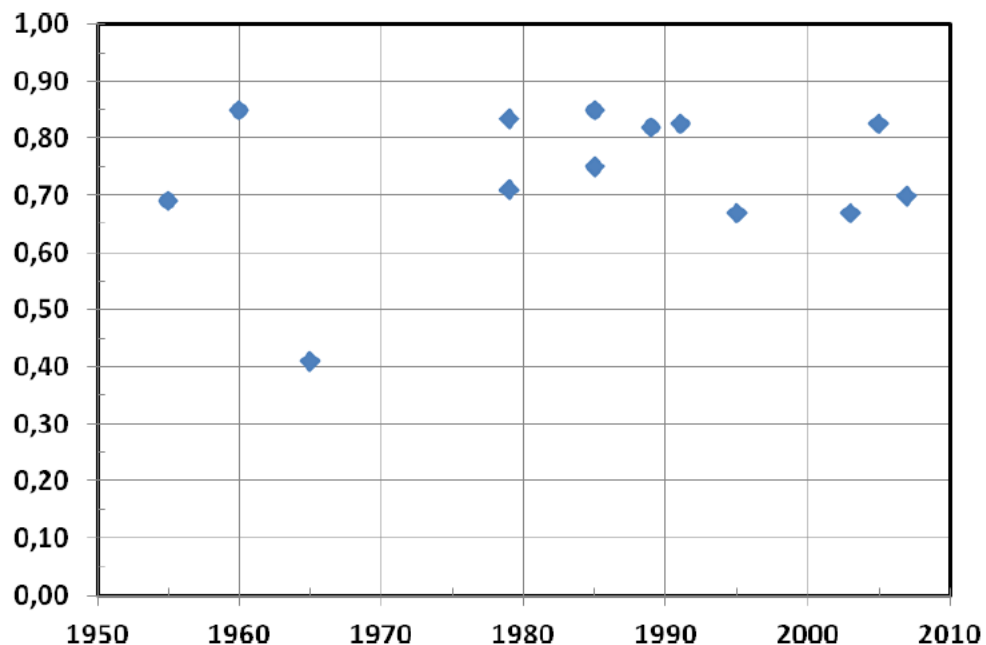


Figura 2.15 – Gráfico da eficiência térmica média reportada por autores pelo ano da publicação
(Fonte: Stenbacka et al., 2012)

Como pode ser visto na Figura 2.15, os dados são apresentados conforme o ano de publicação e é possível visualizar que existe uma grande dispersão entre os resultados, não sendo possível observar qualquer tipo de relação entre eles.

DuPont e Marder (1995), publicaram um dos poucos estudos sobre processo de soldagem arco submerso e chegaram no resultado de eficiência variando entre 83% e 90%, para uma tensão de soldagem de 34 V até 37 V e corrente de 200 A até 320 A.

Analisando os dados adquiridos por outros autores da eficiência térmica para diferentes tipos de solda, Fuerschbach (2004), e realizou uma recomendação de valores a serem utilizados em simulações e cálculos para cada processo de solda. Para o processo de soldagem SAW ele percebeu que as pesquisas mostram uma eficiência média do arco de 90% e recomendou a utilização deste valor como referência.

3. EQUIPAMENTOS E METODOLOGIA

3.1-Descrição do calorímetro utilizado

O calorímetro escolhido para o embasamento do trabalho foi o Calorímetro à Água com fluxo contínuo (Figura 3.1). 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.

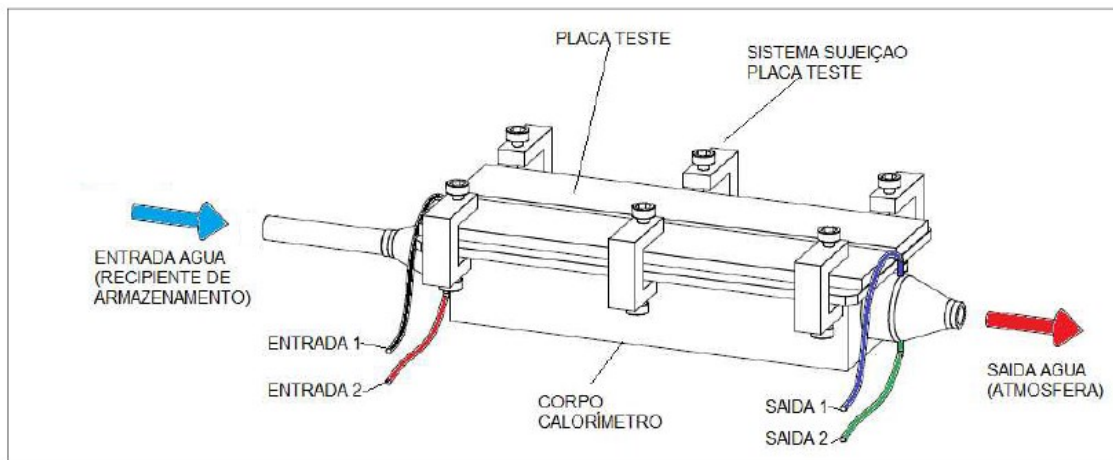


Figura 3.1 – Esquema do calorímetro de fluxo contínuo utilizado (Arevalo, 2011)

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.

As dimensões da placa teste para este tipo de calorímetro são de 200 x 100 x 6,35 (mm), utilizando material base aço carbono ASTM A36, com chanfro no centro em sentido longitudinal.

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 -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 3.2 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).

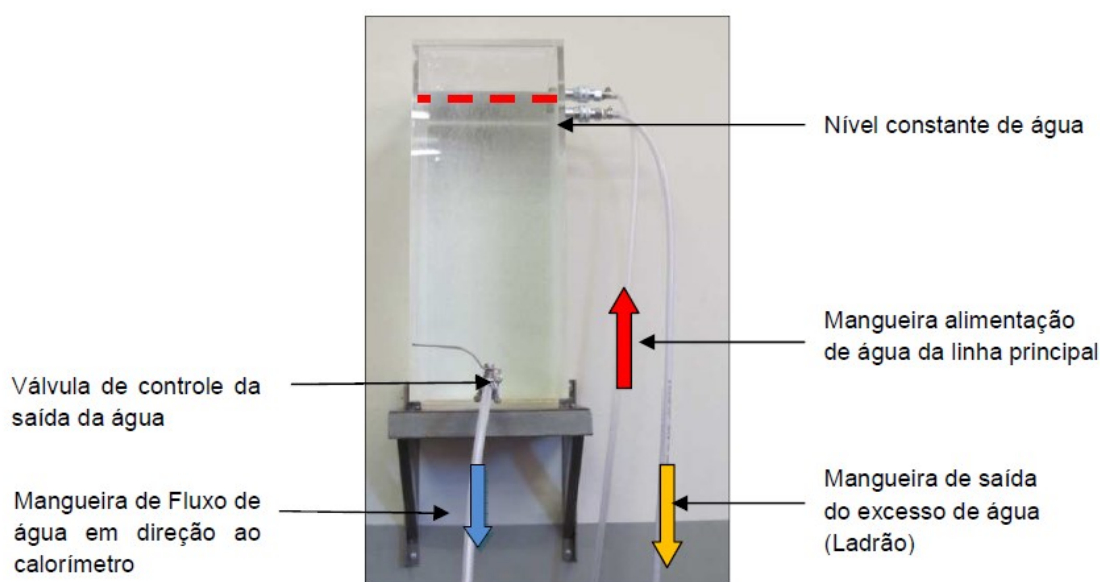


Figura 3.2 - Recipiente de armazenamento de água com capacidade aproximada de 30 litros (Arevalo, 2011)

Para determinar a vazão da água durante os ensaios, o reservatório foi mantido cheio e a extremidade final da saída da mangueira foi mantida, em todos os ensaios, em uma mesma altura, para se aproximar o máximo possível de uma vazão constante para todos os ensaios.

3.3- Sistema de Aquisição de Dados do Calorímetro

O sistema de aquisição de dados do calorímetro deve receber os dados de tensão, corrente, temperatura inicial e temperatura final (Figura 3.3).

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.

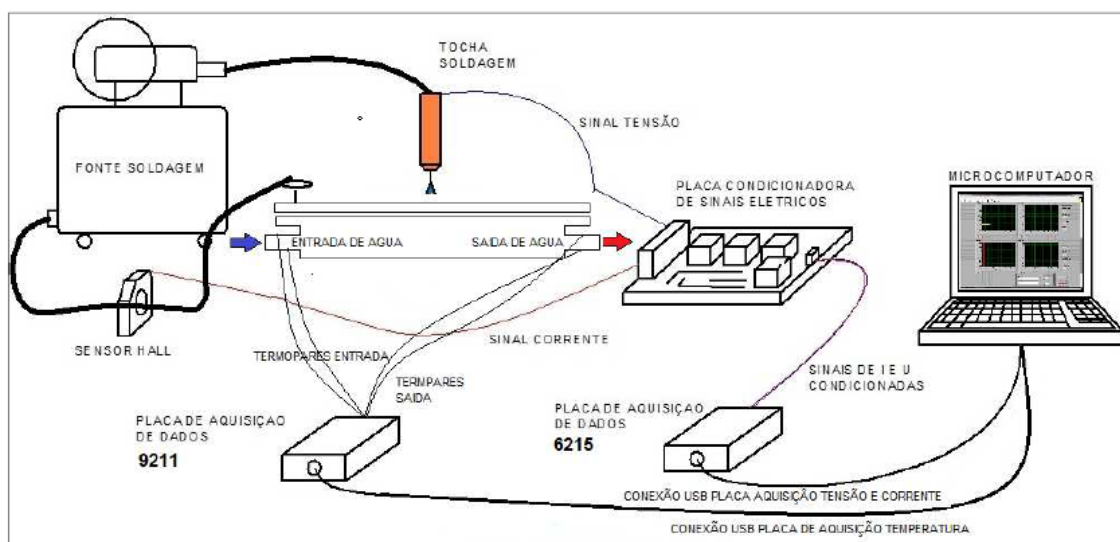


Figura 3.3 – Sistema de aquisição de sinais elétricos para o calorímetro (Arevalo, 2011)

3.4 – Parâmetros e consumíveis

O presente trabalho se embasou na comparação da eficiência térmica do processo de soldagem MIG/MAG, processo este realizado utilizando parâmetros de soldagem semelhantes. Segue abaixo os parâmetros e consumíveis utilizados:

- ✓ Gás de proteção: Argônio 2% CO₂ STARGOLDTUB;
- ✓ Vazão do gás: 15l/min;
- ✓ DBCP: 18mm
- ✓ Arame para soldagem MIG/MAG

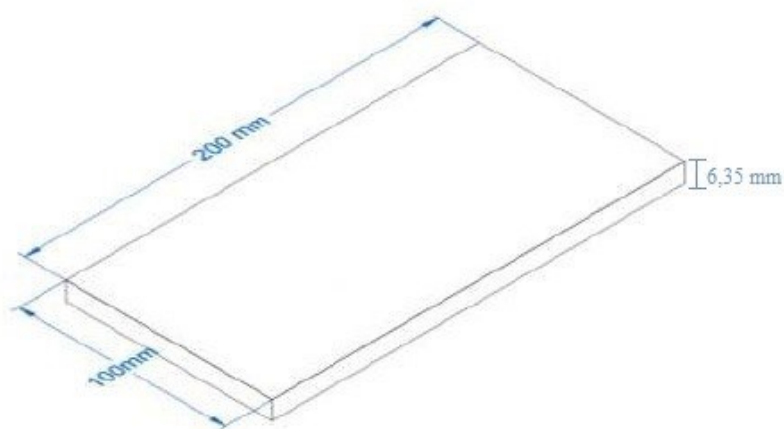


Figura 3.4 - Dimensões da chapa utilizada nos testes

3.5- 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 os processos 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. Dois tipos de curvas são esperadas para os processos analisados. A Figura 3.5 apresenta a curva para o processo de soldagem GMAW.

Conforme pode ser observado nas Figuras 3.5 e 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.

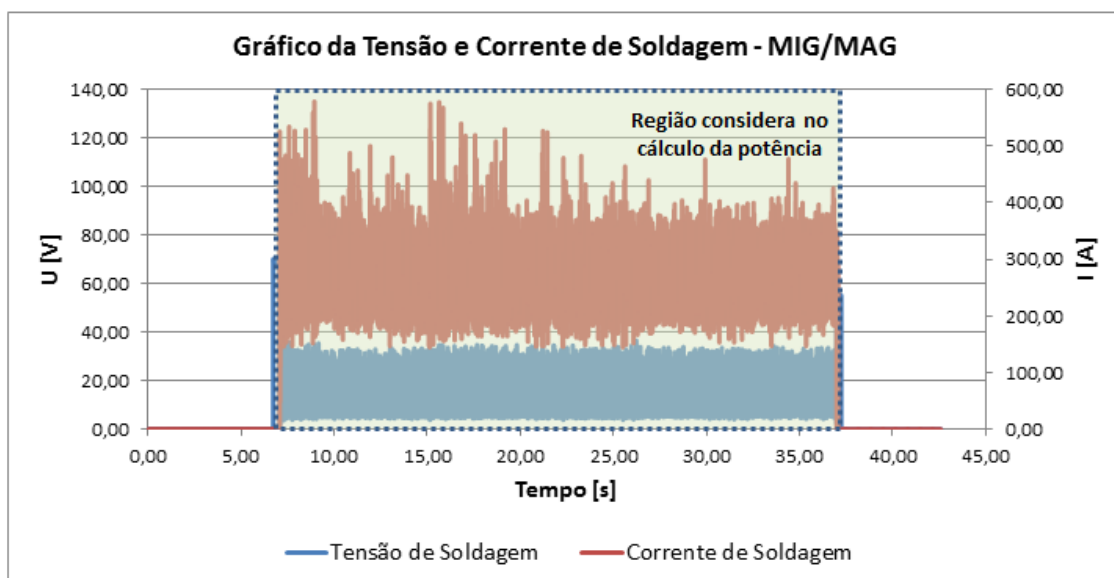


Figura 3.5 – Curvas típicas de tensão e corrente de soldagem para o processo de soldagem GMAW. Em destaque a região utilizada no cálculo da potência instantânea média

3.6 – 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.

3.7 – Metodologia para Obtenção do Aporte Térmico

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

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

Onde é a vazão mássica de água que passa pelo calorímetro é dada em kg/s, o calor específico da água em J/kg·K, e são as temperaturas de saída e entrada da água no calorímetro, respectivamente, ambas em K e 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, utilizando seus valores tabelados na temperatura de entrada da água no

calorímetro de cada ensaio. A vazão mássica de água permanece 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 kg/m^3 .

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 3.6.

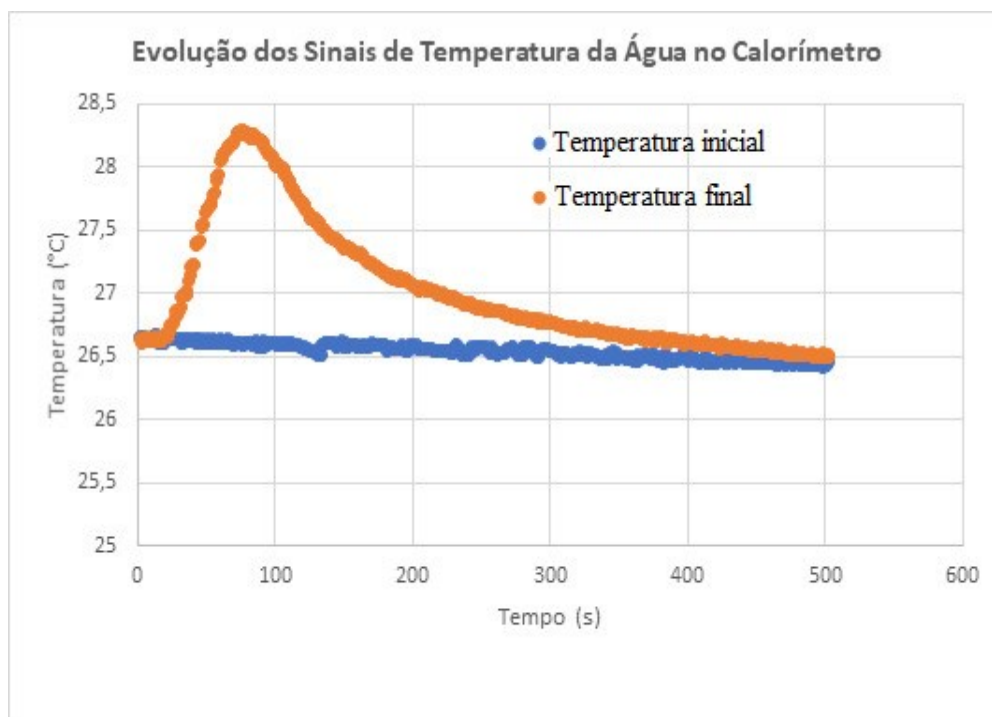


Figura 3.6 – Evolução dos sinais de temperatura da água esperada para os ensaios.

Percebe-se a existência de duas curvas resultantes. Uma está associada com a medição de temperatura da água no ponto de entrada do calorímetro, outra, com a medição de temperatura da água no ponto de saída do calorímetro. Os dados obtidos pelo sistema de aquisição foram analisados e tratados no software Microsoft Office Excel. É possível que, devido a interferências elétricas ou outros fatores fora de controle, alguns pontos da amostragem não representem valores condizentes com o experimento, portanto estes pontos foram eliminados da curva. Também foi eliminado o conjunto de pontos antes de ocorrer o aquecimento da água. Padronizou-se para os ensaios que o monitoramento de temperatura seria encerrado 20 segundos após o momento em que a variação de

temperatura entre a entrada e a saída de água fosse equivalente à metade do erro do sensor, ou seja, $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$

3.8– 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 o reforço (R), a largura (L), a penetração (P), área fundida (Af) e área de reforço (Ar) conforme a Fig. 3.7.

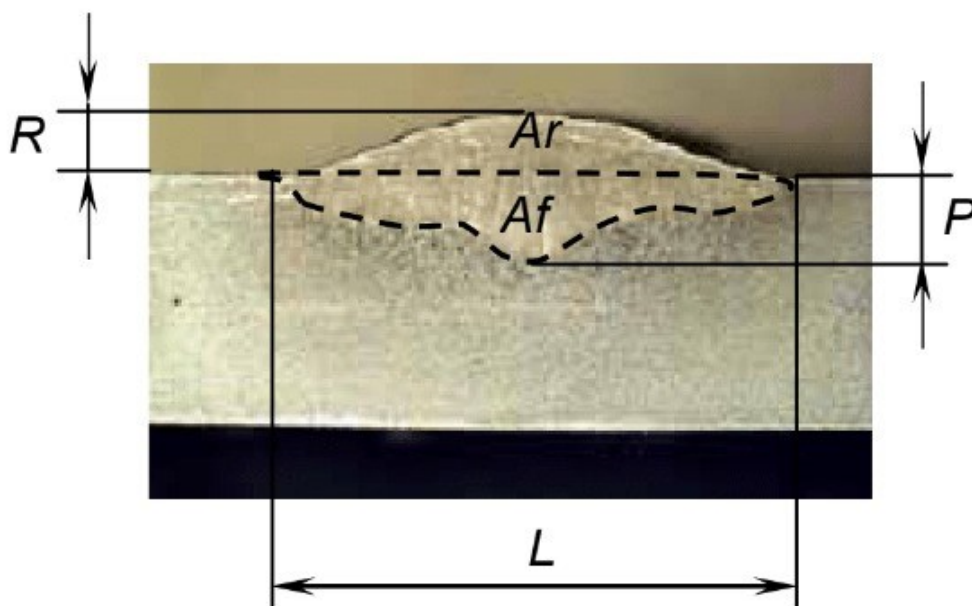


Figura 3.7 – Características geométricas dos cordões a serem medidas para fins Comparativos

3.9 – Fonte de soldagem

Para a realização das soldas com o processo MIG/MAG, utilizou-se uma fonte multiprocessos transistorizada, chaveado no secundário (Figura 3.8). Com capacidade de corrente de até 450 A. A Tabela 3.1 traz as principais características técnicas deste equipamento.



Figura 3.8 – Fonte de soldagem IMC Digiplus A7

Tabela 3.1 – Características técnicas 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

O regulador com o manômetro e o indicador de vazão utilizados encontram-se apresentados na Figura 3.9.



Figura 3.9 - Medidores de pressão e vazão utilizados

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta etapa foi avaliado a relação entre energia gerada pelo arco e o calor absorvido pelo metal de base caso os parâmetros corrente e tensão fossem variados no processo MIG/MAG, porém, mantendo-se o mesmo produto.

No processo MIG/MAG utilizou-se apenas uma DBCP, alterando-se os valores de tensão e velocidade de alimentação do arame, ilustrados na Tabela 4.1.

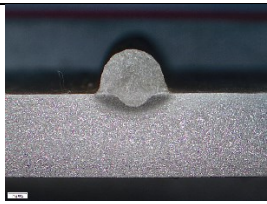
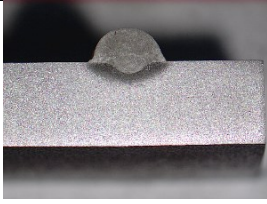
Tabela 4.1 – Valores definidos e obtidos em soldagem MIG/MAG

DBCP (mm)	U (V)	I (A)	Va (m/min)	Tempo (s)	Potência (W)	Es(J)	Cabs (J)	η (%)
16	18	96	5,0	20	1704	40086,0	31898,1	80
	16	98	5,5	20	1631	40531,5	33071,0	82

Por meio dos dados resultantes dos ensaios preliminares, é possível inferir que tanto a corrente como a tensão afetam de forma independente o rendimento da soldagem, como pode se notar na Tabela 4.1. Ao passo que a velocidade de alimentação é aumentada, a energia de soldagem também aumenta, mesmo que o valor da tensão tenha sido reduzido. Isso acontece porque a velocidade de alimentação do arame é diretamente proporcional à corrente, ou seja, aumentando a velocidade de alimentação do arame, a corrente também é acrescida, aumentando a energia de soldagem. Além disso, percebe-se que esse aumento da velocidade de alimentação resultou em um ligeiro aumento no rendimento, sugerindo que o produto destes parâmetros, representado pela a potência, não é a principal variável responsável por governar a eficiência do processo.

Em seguida, foram realizados testes em chapas submetidas ao um calorímetro de fluxo contínuo de água. Por meio da macrografia, foram avaliadas as variações da geometria do cordão de solda para diferentes parâmetros de tensão e corrente.

Tabela 4.2 – Características do cordão de solda ao variar alguns parâmetros de soldagem
MIG/MAG

Ensaio		Penetração (mm)	Largura (mm)	Reforço (mm)	Área (mm ²)	Corte da seção transversal do cordão
1	16V, 5,5m/min 98A	1,05	6,07	3,25	16,13	
		1,02	6,01	3,11	15,86	
2	16V, 5,5m/min 98A	0,92	6,04	3,07	15,59	
		0,95	5,99	3,05	15,54	
3	18V, 5,0m/min 96A	0,82	6,21	2,9	15,38	
		0,8	6,26	2,82	15,31	
4	18V, 5,0m/min 96A	0,81	6,2	2,66	15,33	
		0,79	6,25	2,71	15,24	

Os valores médios de penetração, largura e área foram colocados na figura a seguir (Figura 4.1) para mostrar qual é o comportamento desses parâmetros quando se altera a tensão de 16 V para 18 V.

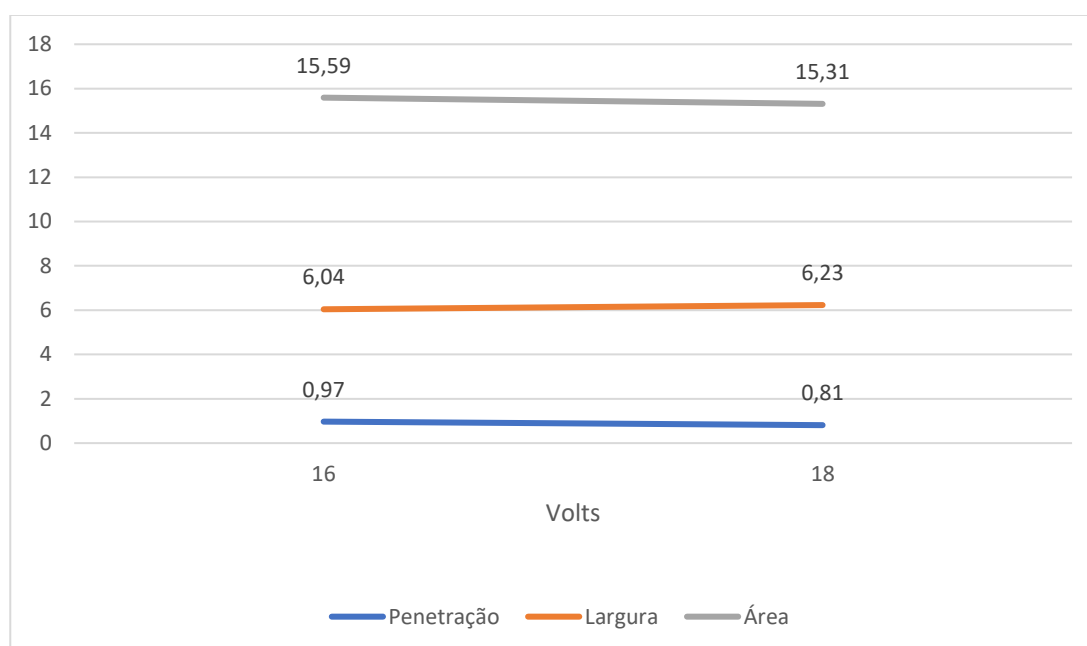


Figura 4.1 - Comportamento dos parâmetros penetração, largura e área do corte transversal para duas tensões diferentes

Olhando a tabela 4.2 e o gráfico 4.1, nota-se que a penetração e a largura teve uma variação mais significativa que a área, embora todas tenham sido relativamente pequenas. O leve decréscimo na penetração e na área se deve ao fato de que, ao aumentar a tensão de 16V para 18V, a corrente cai, mostrando mais uma vez que o parâmetro que governa a

soldagem é a corrente. Já o acréscimo na largura se deve ao fato de que, ao aumentar a tensão, a coluna de plasma fica menos concentrada, ou seja, o acoplamento arco-peça fica maior (Figura 4.2), aumentando a largura do cordão e, conseqüentemente reduzindo a penetração e a área fundida. A região catódica é a principal responsável pela formação do arco, pois é onde acontece a emissão de elétrons na coluna de plasma, ou seja, essa quantidade de elétrons define a distribuição espacial do arco voltaico e na característica do cordão.

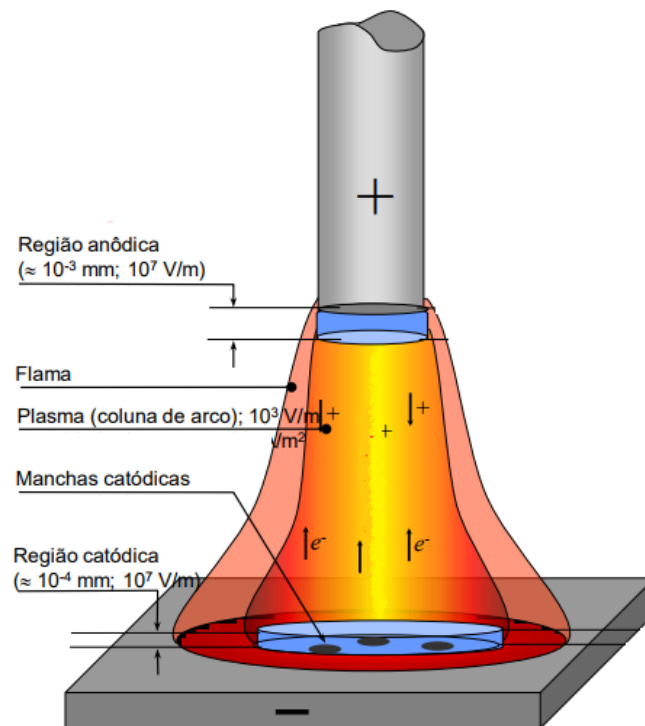


Figura 4.2 -Estrutura do arco elétrico

5. 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 para que fosse feita a comparação das 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.

Assim, analisando os resultados mostrados, pode-se novamente afirmar que o principal parâmetro que governa a soldagem e a transferência metálica é a corrente, contrapondo a norma que diz que, mantendo-se a potência de soldagem constante (ou seja, o produto da tensão pela corrente), as características e geometria do cordão de solda serão as mesmas, independentemente dos valores dos parâmetros tensão e corrente.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AREVALO, H. H. **Desenvolvimento e Avaliação de Bancada Experimental para Calorimetria via Nitrogênio Líquido e Fluxo Contínuo (Água) em Processos de Soldagem**. 2011. 145p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia – MG, Brasil.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: Melhor Entendimento, Melhor Desempenho**. 2.ed. São Paulo: Artliber, 2014. 288p.

MARQUES, P. V., MODENESI, P. J., BRACARENSE, A. Q., **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**, Belo Horizonte, Editora UFMG, 2007.

GUIMARÃES, GIL: **Apostila de Processos Metalúrgicos- Soldagem**.