

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

INFLUÊNCIA DO GÁS DE PROTEÇÃO SOBRE O APORTE DE ENERGIA NA SOLDAGEM
MIG/MAG DE AÇOS AO CARBONO

por

Carlos Berwanger Bohrer

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Novembro de 2013

INFLUÊNCIA DO GÁS DE PROTEÇÃO SOBRE O APORTE DE ENERGIA NA SOLDAGEM
MIG/MAG DE AÇOS AO CARBONO

por

Carlos Berwanger Bohrer

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof^a. Dr^a. Thamy Cristina Hayashi
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Projeto e Fabricação

Orientador: Prof. José Antônio E. Mazzaferro

Comissão de Avaliação:

Prof. Ney Francisco Ferreira

Prof. Rafael Antônio C. Laranja

Prof. Cíntia C. Petry Mazzaferro

Porto Alegre, 14 de Novembro de 2013.

AGRADECIMENTOS:

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a minha família por sempre me proporcionar as condições necessárias para poder me formar pela UFRGS em Engenharia Mecânica. Este apoio não foi apenas financeiro, mas também psicológico durante esta difícil caminhada e sem eles nada disto seria possível. Venho por meio deste agradecer a todos meus amigos desde a época do Anchieta até os colegas de faculdade. Sem eles, tudo seria muito menos divertido e, cada um deles ajudou a construir a pessoa que sou hoje. Muito obrigado também a minha namorada que está sendo muito importante na minha vida.

Gostaria também de agradecer as pessoas do LS&TC desde a época da minha bolsa e que ajudaram muito nos experimentos para ser realizado este trabalho. Obrigado a todos meus professores que me deram base teórica para poder, futuramente, aplicar os conhecimentos adquiridos na faculdade no mercado de trabalho. Agradeço ao professor Mazzaferro por sua inacabável paciência durante a orientação do meu TCC.

Também agradeço a todos meus colegas de trabalho da Pirelli, da Kauffmann e da GKN. Todos os ensinamentos obtidos nestas empresas foram também de suma importância para mim.

“Continuous effort- not strength or intelligence-
is the key to unlocking our potential”

Winston Churchill

BOHRER, C.B **Influência do Gás de Proteção Sobre o Aporte Térmico na Soldagem MIG/MAG de Aços ao Carbono**. 2013. 22. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

RESUMO:

Neste trabalho é feita a análise de calor na soldagem MIG/MAG, a fim de medir a quantidade de energia que efetivamente é transferida para a peça. O trabalho foi realizado no Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas da UFRGS (LS&TC) e a medição do calor foi feita utilizando um calorímetro desenvolvido no laboratório. O procedimento experimental consiste em variar as quantidades de Argônio e CO₂ no gás de proteção para diferentes níveis de energia de soldagem. Foi encontrado maior rendimento térmico para o gás de proteção com 100% de CO₂ com energia de soldagem de aproximadamente 1000 J/mm utilizando velocidade de soldagem de 2,5 mm/s. Para este gás de proteção o rendimento térmico médio encontrado foi de 69,22%. O menor rendimento térmico encontrado foi do gás de proteção com 75% de Argônio e 25% de CO₂ para energia e velocidade de soldagem de 500J/mm e 5mm/s respectivamente. O rendimento térmico médio para este gás de proteção foi de 51,10%. Os rendimentos térmicos obtidos para baixas velocidades de soldagem foram superiores aos observados com altas velocidades de soldagem, comparando os mesmos gases de proteção. Para três das quatro misturas estudadas, maiores quantidades de CO₂ no revestimento produziram maiores rendimentos. A exceção foi a mistura contendo Ar+25% CO₂, que não seguiu a tendência das demais.

PALAVRAS-CHAVE: Soldagem MIG/MAG; Rendimento Térmico; Energia de Soldagem; Gás de Proteção.

BOHRER, C.B Influence of Protective Gas over the Thermal Contribution in the MIG / MAG welding of Carbon Steels. 2013. 22. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ABSTRACT:

In this work, an analysis was made of heat input in MIG/MAG welding, in order to measure the heat that was effectively transferred to the work piece. The work was performed at the Laboratory of Welding and Related Techniques UFRGS (LS&TC) and measurement of the heat was done using a calorimeter developed in the laboratory. The experimental approach consists in varying the amount of Argon and CO₂ in the protective gas for different levels of welding energy. A higher thermal efficiency was obtained for the protective gas with 100% CO₂ with welding energy of approximately 1000 J / mm using welding speed of 2.5 mm / s. The average thermal efficiency for this protective gas was 69.22%. The lower thermal efficiency was found the protective gas with 75% Argon and 25% CO₂ for power and welding speed of 500J/mm and 5mm/s respectively. The average thermal efficiency for this protective gas was 51.10%. The thermal efficiencies for low welding speed achieved superior results compared to those with high welding speed, comparing the same protection gases. For three of the four studied gas mixtures, greater amounts of CO₂ could be associated to bigger thermal efficiency. The exception was the Ar+25% CO₂ mixture that has presented a different behavior.

KEYWORDS: MIG/MAG Welding; Thermal Efficiency; Welding Energy; Protective Gas.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	1
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	1
3.1 Princípios da Soldagem MIG/MAG.....	1
3.2 Principais Gases na Soldagem MIG/MAG.....	2
3.3 Modo de Transferência do Metal.....	2
3.4 Energia de Soldagem.....	3
3.5 Modo de Cálculo para Energia Térmica.....	3
3.6 Trabalhos Anteriores.....	3
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	5
4.1 Equipamentos de Soldagem.....	5
4.2 Método para Cálculo da Energia de Soldagem.....	5
4.3 Método para a Medição de Calor na Peça.....	5
4.4 Parâmetros Utilizados.....	8
4.5 Cálculo para Rendimento Térmico.....	8
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	9
6. ANÁLISE DE INCERTEZAS.....	13
7. CONCLUSÕES.....	13
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	14

1. INTRODUÇÃO

É de senso comum que, para se ter desenvolvimento tecnológico em um país, é preciso se ter profissionais capacitados para estudar a fundo sobre as evoluções da tecnologia. Tendo pesquisadores em áreas importantes se gera lucro futuramente. É muito importante investir em estudos para, futuramente, se ter capacidade intelectual de desenvolver melhorias em vários ramos como, por exemplo, processos industriais.

O processo de soldagem é muito utilizado no ramo da Engenharia Mecânica e Engenharia Metalúrgica. Desde os primórdios os seres humanos tiveram a necessidade de unir materiais metálicos e, até hoje se estuda e se aprimora cada vez mais métodos que permitam executar tal atividade. A soldagem foi melhor desenvolvida para a Primeira Guerra Mundial e, devido a indústria automobilística, naval, de mineração e de construção vem evoluindo desde então.

Devido a sua grande aplicação nos processos industriais é necessário um melhor entendimento do processo de soldagem, com os objetivos de reduzir custos, melhorar a eficiência, reduzir a energia gasta, etc. Este é um processo de extrema complexidade, pois envolve muitas áreas de estudo assim como metalurgia, resistência dos materiais e transferência de calor. Atualmente se tem altos investimentos em pesquisas com o objetivo de se ter um melhor entendimento deste processo. Assim, obtém-se melhorias significativas na área como, por exemplo, economizar gastos desnecessários com energia.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é analisar o aporte de calor na soldagem MIG/MAG, medindo a quantidade de energia que efetivamente será transferido para a peça. Este experimento também consiste em validar a medição de calor transferido através de um calorímetro de baixo custo, fácil manuseio e simples montagem. Analisar a influência do gás de proteção sobre o aporte de energia na soldagem MIG/MAG é um tema interessante, pois a correta escolha da mistura usada pode refletir em redução de custos ou aumento da eficiência do processo, por exemplo. Também é analisada a influência da velocidade de soldagem no processo. Com os resultados obtidos pode se concluir quais parâmetros de soldagem e misturas são mais eficientes e, assim, fazer a escolha correta para aumentar o lucro.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Princípios da Soldagem MIG/MAG

Segundo *American Welding Society*, 2001, o processo de soldagem MIG/MAG se baseia na fonte de calor de um arco elétrico mantido entre a extremidade de um arame nu consumível, alimentado continuamente, e a peça a soldar. A proteção da região da solda é feita com uma atmosfera protetora de gás inerte (Argônio ou Hélio), ativo (CO_2) ou suas misturas. A escolha do gás de proteção na soldagem MIG/MAG está relacionada tanto com fatores relativos aos materiais quanto ao modo operacional do processo.

Para se produzir soldas com qualidade, é preciso no processo MIG/MAG fornecer um fluxo de gás em torno do metal base, principalmente para proteger a poça de fusão e gotas em transferência. Também tem funções de estabilizar o arco, controlar a operacionalidade e a transferência do metal, influir sobre geometria, propriedades mecânicas e características metalúrgicas da solda.

3.2 Principais Gases na Soldagem MIG/MAG

Segundo Scotti e Ponomarev, 2008, os principais tipos de gases de proteção usados no processo MIG/MAG são o Argônio, o Hélio, o Dióxido de Carbono (CO₂) e o Oxigênio. A alta capacidade de troca de calor do CO₂ e sua energia liberada na recombinação fazem transferir mais calor para o metal base quando comparado ao Argônio puro. Nas altas temperaturas de arco o mesmo se dissocia em CO (reductor) e ½O₂ (oxidante) e se ioniza, não sendo considerado neutro. Para se soldar com CO₂ puro se demanda maior tensão para manter o arco aberto e evitar respingos gerando falta de penetração. Seu potencial de ionização favorece a estabilidade do arco, entretanto, aumenta a tensão superficial metal líquido / meio ambiente, favorecendo a transferência por curto circuito e dificultando a soldagem goticular. O equilíbrio termodinâmico da reação dissociação / associação de CO₂ depende da temperatura e de outros elementos ao redor, portanto da região do arco.

O gás de proteção mais comum usado na soldagem MIG/MAG é uma mistura de Argônio com CO₂. A adição de CO₂ no Argônio pode aumentar a estabilidade de arco nos metais ferrosos, melhora o desempenho do gás na soldagem por curto circuito e o deixa mais quente, além de reduzir consideravelmente a quantidade de respingos, melhorando o aspecto superficial do cordão. A mistura de Argônio com 25% de CO₂ e com 10% de CO₂ tem transferência predominante por curto circuito, apesar de ser possível a transferência goticular.

Segundo Machado, 1996, a adição do CO₂ no Argônio é notável até 10%, podendo tornar progressivamente o arco instável até cerca de 30% quando, então, o mesmo se assemelha a CO₂ puro. Em torno de 30% de CO₂ a taxa de fusão do arame atinge um máximo, enquanto a penetração tem um máximo com 40% de CO₂, se estabilizando deste ponto. A utilização de 100% de Argônio como gás de proteção, não é usual em metais ferrosos, pois este não proporciona estabilidade adequada na transferência e o metal de solda não tem molhabilidade, produzindo cordões convexos.

3.3 Modo de Transferência do Metal

Segundo Machado, 1996, o modo como o metal fundido se transfere desde o eletrodo para a peça, é determinado por complexas interações de forças, as quais em são influenciados por fatores como: natureza do gás de proteção, polaridade, tipo (contínuo ou pulsado) e densidade da corrente, tensão, extensão do eletrodo após contato elétrico, pressão de evaporação dos materiais envolvidos e ao fluxo de gás de proteção.

O modo de transferência na soldagem MIG/MAG pode ser por curto circuito, globular, por gotas repetidas e projetadas, axial em aerossol e axial por corrente pulsada.

No modo de transferência por curto circuito a ponta do arame pode manter contato com a poça de fusão ocorrendo a extinção momentânea do arco. Este modo ocorre quando a velocidade de alimentação do arame excede a taxa de fusão e acontece em baixas correntes e tensões. Quando o arame toca a peça, a tensão cai e a corrente aumenta bruscamente, como mostra a Figura 3.1. A taxa de aumento da corrente em relação ao tempo é muito importante para este modo, entretanto não pode ser excessiva para evitar a formação de salpicos. Um número excessivo de salpicos piora a qualidade do cordão e pode produzir penetração insuficiente, diminuindo assim o calor que é transferido para a peça.

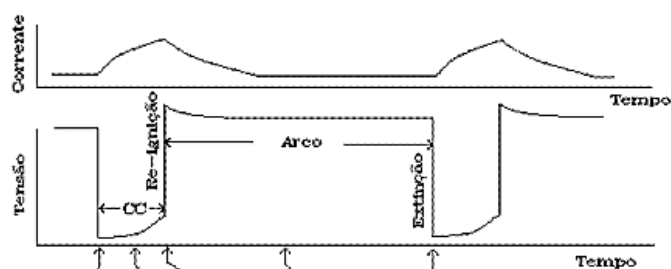


Figura 3.1: Gráfico mostrando o modo de transferência por curto circuito.

Segundo Scotti e Ponomarev, 2008, devido aos valores baixos de corrente e tensão durante a fase de arco aberto no modo de transferência por curto circuito, assim como o fato de que durante parte do processo este arco tende a se extinguir, o calor transferido para a peça é reduzido.

3.4 Energia de Soldagem

A energia de soldagem é aquela introduzida no metal de base por unidade de comprimento do cordão de solda. A energia de soldagem é calculada pela Equação 3.1. [Machado, 1996].

$$E = \eta \frac{IU}{v} \quad (3.1)$$

Onde, E = energia de soldagem [J/mm], η = rendimento térmico de cada processo, I = corrente de soldagem [A] e U = tensão de soldagem [V].

O produto UI é uma unidade de potência [W] e está relacionado com a energia elétrica produzida no arco elétrico pelo equipamento de soldagem.

3.5 Modo de Cálculo para Energia Térmica

Segundo Incropera, DeWitt, Bergman e Lavine, 2008, a Equação 3.2 mostra o método do cálculo simplificado da energia térmica para sistemas com escoamento em regime estacionário.

$$q = \dot{m}c_p (T_s - T_e) \quad (3.2)$$

Onde, q = calor trocado [J/s], \dot{m} = vazão mássica [kg/s], c_p = calor específico [J/kgK], T_e = temperatura de entrada [K] e T_s = temperatura de saída [K].

Essa equação pode ser utilizada para um líquido incompressível com variação da energia cinética e potencial desprezíveis, incluindo trabalho de escoamento. Quando não há grandes variações na pressão pode-se considerar o trabalho de escoamento desprezível para um líquido incompressível. Essa equação também pode ser utilizada para líquidos com dissipação viscosa desprezível.

A vazão mássica de um fluido pode ser representada pela Equação 3.3. [Incropera, DeWitt, Bergman e Lavine, 2008].

$$\dot{m} = \rho \dot{V} \quad (3.3)$$

Onde, ρ = densidade da água [kg/m³] e \dot{V} = vazão volumétrica da água [m³/s]

3.6 Trabalhos Anteriores

A seguir são apresentados estudos anteriores analisando rendimentos térmicos do processo MIG/MAG com calorímetros de fluxo contínuo. Nestes estudos, mantendo o gás de proteção, foram variados os parâmetros de soldagem.

Em estudos feitos por Lu e Kou, 1989, mediu-se o calor transferido para a peça utilizando um calorímetro de fluxo contínuo para gás de proteção com 100% de Argônio. Os rendimentos térmicos, variando os parâmetros de soldagem são mostrados na Tabela 3.1

Tabela 3.1: Valores de rendimentos térmicos obtidos por Lu e Kou utilizando gás de proteção com 100% de Argônio e calorímetro de fluxo contínuo.

U_m [V]	I_m [A]	v [mm/s]	va [m/min]	n [%]
19,4	78	10,2	2,5	83
22,6	128	10,2	3,0	81
27,8	176	10,2	4,0	81
28,2	251	10,2	5,8	80

Arévalo, 2011, estudou o comportamento do rendimento térmico na soldagem MIG/MAG utilizando gás de proteção 75% de Argônio com 25% de CO_2 . Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Valores de rendimentos térmicos obtidos por Arévalo utilizando gás de proteção 75% de Argônio com 25% de CO_2 e calorímetro de fluxo contínuo.

U_m [V]	I_m [A]	v [mm/s]	va [m/min]	n [%]
19	122	5	4,0	71
29	287	5	8,5	67

Sgarbi, 2013, também realizou estudos com o objetivo de analisar o rendimento térmico do processo MIG/MAG com um calorímetro de baixo custo. Em seus experimentos foi utilizado o gás 90% de Argônio com 10% de CO_2 . A vazão do gás usado é de 15 l/min e a distância do bico de contato-peça (DBCP) é de 18mm. A Tabela 3.3 mostra os resultados obtidos.

Tabela 3.3: Valores de rendimentos térmicos obtidos por Sgarbi, 2013 para 90% de Argônio com 10% de CO_2 , vazão do gás de 15l/min e DBCP de 18mm.

Solda	U_m [V]	I_m [A]	v [mm/s]	va [m/min]	n [%]
1	20	125	5	2,9	76,26
2	20	250	5	7,7	71,60
3	30	340	10	11,9	70,60
4	20	250	5	7,7	66,19
5	20	125	5	2,9	49,93
6	30	340	10	11,9	59,01
7	30	350	5	12,4	66,12

Onde, U_m = tensão de soldagem [V], I_m = corrente de soldagem [A], v = velocidade de soldagem [mm/s] e va = velocidade de alimentação do arame [m/min].

As soldas 1, 2, 3 e 4 foram realizadas com um corpo de prova de 63,5 mm de diâmetro. As outras soldas foram realizadas com corpo de prova de 89,0 mm de diâmetro. Para ser realizado o cordão de solda 4 não foi utilizado nenhum método para se isolar termicamente o calorímetro.

Conforme pode ser observado nas Tabelas 3.1 a 3.3, os resultados de rendimentos térmicos obtidos variam em até 10% utilizando parâmetros de soldagem semelhantes.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Equipamentos de Soldagem

Para a execução das soldas, utilizou-se um sistema robotizado composto pela fonte TransPuls Synergic 4000R da Fronius, pelo robô MA1400 da Yaskawa Motoman Robotics, pelo alimentador de arame VR 1500 4R/W/E Roboter, também da Fronius, e pelo manipulador iCAT com cabos e tocha de soldagem Robo WH, ambos de fabricação da Abicor Binzel.

O robô possui seis graus de liberdade, sendo três para posicionamento da tocha de soldagem e três para sua orientação. O programa de soldagem consistiu basicamente da gravação das posições inicial e final do cordão de solda, assim como da velocidade de deslocamento da tocha.

A fonte de soldagem é completamente digitalizada e possui controle interno por microprocessador, garantindo a repetitividade dos parâmetros ajustados. As soldas foram realizadas com o arame AWS ER10S-6 com diâmetro de 1,2 mm.

O sistema SAP v 4.01, fabricado pela IMC Soldagem, foi utilizado para aquisição de dados e para o monitoramento dos parâmetros instantâneos de soldagem, como corrente e tensão de soldagem e velocidade de alimentação do arame. A vazão do gás de proteção foi medida após cada alteração de mistura gasosa utilizando um fluxômetro. Ao final de cada soldagem, o sistema também fornece a leitura dos valores médios e eficazes da corrente, da tensão, da potência e do tempo de arco aberto.

4.2 Método para Cálculo de Energia de Soldagem

O sistema de aquisição de dados da fonte adquire os parâmetros de soldagem como tensão e corrente de soldagem com frequência de 5Hz. Com isto pode-se calcular a energia instantânea de soldagem.

A energia média fornecida pela fonte pode ser calculada pela Equação 4.1. [Machado, 1996].

$$E_f = \frac{I_m U_m}{v} \quad (4.1)$$

Onde E_f = energia média de soldagem [J/mm], I_m = corrente média de soldagem [A] e V_m = tensão média de soldagem [V] e v = velocidade de soldagem [mm/s]

Para se obter os valores médios de tensão e de corrente de soldagem precisa-se fazer a média dos valores instantâneos das mesmas.

4.3 Método para Medição da Quantidade de Calor na Peça

Para uma medição de calor que passa efetivamente para a peça a ser soldada, deve-se tomar cuidado com a montagem do calorímetro. Este deve fornecer a medição com o mínimo de erro possível. A medição de calor utilizando o calorímetro baseia-se na diferença de temperaturas de entrada e de saída da água que passa através dele.

O calorímetro é montado da seguinte forma:

- Um tubo mecânico a ser soldado de aço laminado sem costura e de boa soldabilidade. O tubo possui diâmetros externos de 63,5 mm, diâmetro interno de 58,5 mm, comprimento de 200 mm e atende a norma DIN 2391 St-52. Para colocar o terra soldou-se uma fina chapa no tubo;
- Duas rolhas de borracha com furo passante com função de vedar o tubo, evitando vazamento e permitindo a passagem da água por ele;

- Duas calhas de PVC com lâminas de cortiça coladas internamente com a função de isolar termicamente o tubo de aço. Uma das calhas é posicionada na parte inferior do tubo e outra posicionada na parte superior, logo depois de realizada a soldagem;
- Quatro termopares (dois na entrada e dois na saída) utilizados para medir as temperaturas antes e após a soldagem. Para medição das temperaturas foram utilizados termopares tipo T (par de cobre e constantan), apresentando $50\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ e erro de $\pm 1^\circ\text{C}$, com faixa de operação entre -270°C a 400°C .
- Dois suportes para termopares com registros para regular a vazão de água. Estes tubos são feitos de CPVC e apresentam baixa condutividade térmica. Um é montado na entrada e outro na saída.

A água deve ter vazão contínua e fluxo laminar. São mostradas na Figura 4.1 as fotos dos componentes do calorímetro.

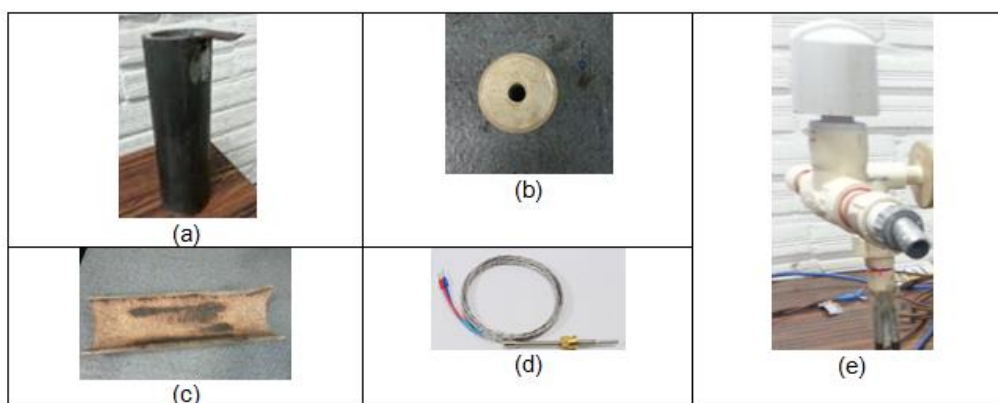


Figura 4.1- Componentes do calorímetro: (a) tubo de aço de baixo carbono, (b) rolha de borracha com furo passante para vedação, (c) calhas de PVC com lâminas de cortiça coladas internamente, (d) termopar para medição de temperatura, (e) suporte para termopar de CPVC com registro para controle da vazão da água.

Para medir a vazão de água que passa pelo calorímetro foram feitos testes regulando o registro de saída do calorímetro, deixando o registro de entrada completamente aberto. A vazão foi medida com um balde com graduação milimétrica até ser regulada para 2 l/min ($3,3 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$).

Para se garantir fluxo constante de água no interior do calorímetro deve-se assegurar que não ocorram variações de pressão no sistema de alimentação de água. Para manter o nível de água e a pressão constantes, foi utilizado um reservatório (caixa da água) com uma torneira e com uma bóia.

O desenho esquemático do experimento é mostrado na Figura 4.2.

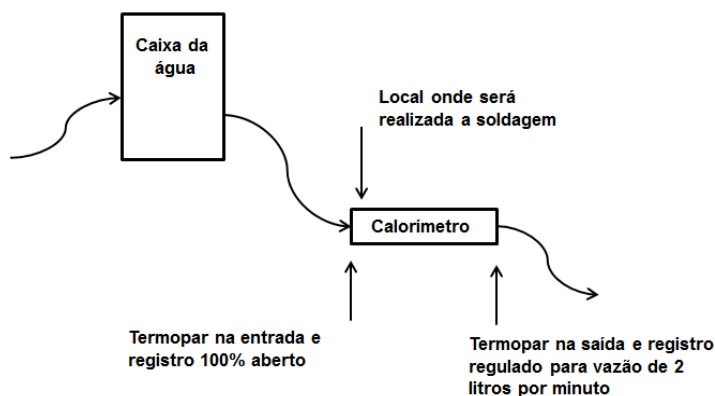


Figura 4.2: Desenho esquemático do experimento.

As temperaturas são gravadas na aquisição de dados a cada 0,1 s. Obtém-se os dados de temperatura de entrada e de saída assim como de temperatura no termopar diferencial a cada variação deste tempo. Com a Equação 4.2 pode-se calcular a quantidade de calor transferido para o calorímetro. [Incropera, DeWitt, Bergman e Lavine, 2008].

$$Q_a = \int_0^t \dot{m} c_p (T_s - T_e) dt \quad (4.2)$$

Onde, \dot{Q}_a = variação da quantidade de calor absorvida pelo calorímetro [J/s], \dot{m} = vazão mássica de água no calorímetro [kg/s], c_p = calor específico da água [J/kg.K], T_s = temperatura de saída no calorímetro [K], T_e = temperatura de entrada no calorímetro e t = tempo total de aquisição de dados [s].

Para se calcular \dot{m} utiliza-se a Equação 3.3.

A metodologia para a medição da variação da quantidade de calor no calorímetro baseia-se na medição de temperatura da água na sua entrada e saída. Considerando a vazão volumétrica da água constante conforme estipulado anteriormente, as propriedades da água tabeladas c_p e ρ consideradas constantes na faixa de temperatura trabalhada para facilitar os cálculos e medindo-se a diferença de temperatura de saída e de entrada no calorímetro através dos termopares, chega-se na Equação 4.3. [Incropera, DeWitt, Bergman e Lavine, 2008].

$$Q_a = c_p \rho \dot{V} \int_0^t (T_s - T_e) dt \quad (4.3)$$

As propriedades da água c_p e ρ são 4180 [J/kg.K] e 1000 [kg/m³] respectivamente. As temperaturas na entrada e na saída do calorímetro foram salvas em uma planilha e analisadas com o auxílio do Microsoft Excel.

Somando todas as linhas do termopar diferencial desde o início da soldagem até a temperatura estabilizar e multiplicando este valor pelo diferencial de tempo 0,1 s, obtém-se a quantidade de calor total. Para obter a quantidade de calor transferido para o cordão de solda utiliza-se a Equação 4.4. Todos os cordões de solda realizados foram medidos e tem 130mm de comprimento. [Machado, 1996].

$$E_a = \frac{Q_a}{c} \quad (4.4)$$

Onde, E_a = quantidade total de calor transferido para o calorímetro por quantidade de comprimento de cordão de solda [J/mm] e c = comprimento do cordão de solda [mm].

Para medir a quantidade de calor transferido para o cordão, analisa-se o intervalo de tempo entre o início da soldagem até a diferença de temperatura de saída e de entrada estabilizarem, como pode ser observado no gráfico da Figura 4.3.

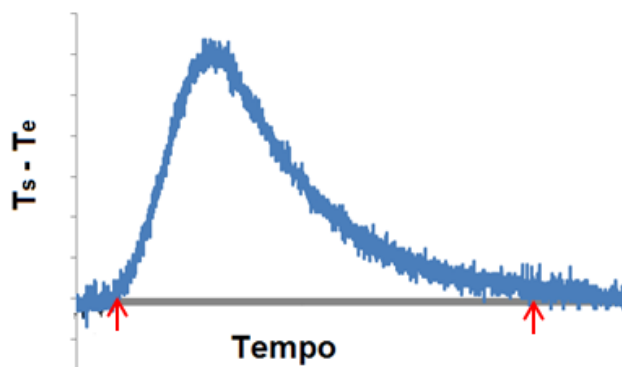


Figura 4.3: Gráfico ilustrativo com o objetivo de mostrar o tempo inicial e final de análise.

4.4 Parâmetros Utilizados

O experimento consistiu em variar as quantidades de Argônio e CO_2 no gás de proteção para diferentes níveis de energia de soldagem. As quatro misturas de gases utilizadas nos testes foram:

- 100% de Argônio
- 90% de Argônio + 10% de CO_2 ,
- 75% de Argônio + 25% de CO_2
- 100% de CO_2

Foram ajustados os parâmetros corrente de soldagem (I), velocidade de soldagem (v), tensão (U), velocidade de alimentação do arame (v_a), distância do bico de contato da peça (DBCP), gás de proteção e vazão do gás de proteção.

Para cada uma das misturas de gases citadas, foram usadas duas energias de soldagem, sendo uma designada no decorrer deste trabalho como “alta” (aproximadamente 1000 J/mm) e outra como “baixa” (aproximadamente 500 J/mm). A variação da energia de soldagem foi feita alterando apenas a velocidade de soldagem, mantendo os demais parâmetros fixos. Para baixa energia foi utilizado velocidade de soldagem de 5 mm/s e para alta, 2,5 mm/s.

A Tabela 4.1 mostra os parâmetros de soldagem utilizado nos experimentos.

Tabela 4.1: Parâmetros utilizados no experimento.

Parâmetro	Energia de Soldagem	
	Alta	Baixa
Energia de Soldagem [J/mm]	1050,5	525,2
Velocidade de Soldagem [mm/s]	2,5	5
Corrente de Soldagem [A]	130	
Tensão de Soldagem [V]	20,2	
Velocidade de Alimentação do arame [mm/min]	3	
Distância do Bico de Contato da Peça [mm]	18	
Vazão do Gás [l/min]	15	

Foram realizados seis cordões de solda para cada gás de proteção (três para baixa energia de soldagem e três para alta). Com os dados adquiridos corretamente pode-se calcular o rendimento térmico. Para o Argônio puro não se repetiu os testes.

4.5 Cálculo do Rendimento Térmico

O cálculo do rendimento térmico é feito dividindo a quantidade de calor absorvido pelo calorímetro pela quantidade de energia total gerada pela fonte. A Equação 4.5 mostra como é obtido o rendimento térmico após a obtenção dos valores da energia de soldagem e do calor transferido para a peça.

$$\eta = \frac{E_a}{E_f} \quad (4.5)$$

A Figura 4.4 mostra os equipamentos necessários para realizar o experimento. A mangueira de saída deve estar suficientemente alta para não alterar a vazão no calorímetro. Cuidados com vazamento são necessários. Os parâmetros devem ser regulados cuidadosamente. É necessário isolar termicamente o calorímetro, posicionar corretamente os termopares e fazer as ligações certas entre eles para uma eficiente medição de temperatura.

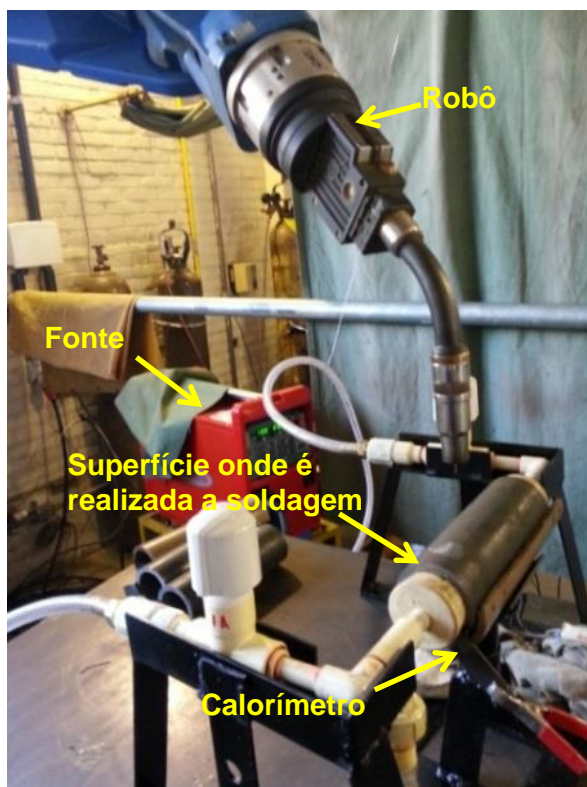


Figura 4.4: Equipamentos preparados para ser realizada a soldagem.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

São apresentados neste capítulo os resultados obtidos dos rendimentos térmicos para as quatro misturas de gases para alta e para baixa energia de soldagem. Foram realizados três cordões de solda para cada energia de soldagem em cada gás. Utilizando gás de proteção com 100% de Argônio, foi feito um cordão de solda apenas para cada energia de soldagem. A Tabela 5.1 mostra os resultados obtidos nos experimentos.

Tabela 5.1: Resultados obtidos.

Identificação	U[V]	I[A]	Va [mm/min]	V [mm/s]	E [J/mm]	t [s]	CO ₂ [%]	Ar [%]	Qs [J/mm]	η [%]
Ar01B	21,7	134	3	5,0	581,6	26,1	0	100	323,50	55,62
Ar01A	21,5	134	3	2,5	1152,4	52,1	0	100	726,68	63,06
10CO01B	21,5	132	3	5,0	567,6	26,1	10	90	329,65	58,08
10CO02B	21,5	132	3	5,0	567,6	26,1	10	90	350,98	61,83
10CO03B	21,3	132	3	5,0	562,3	26,1	10	90	344,58	61,28
10CO01A	21,6	134	3	2,5	1157,8	52,1	10	90	750,17	64,79
10CO02A	21,6	133	3	2,5	1149,1	52,1	10	90	747,50	65,05
10CO03A	21,6	135	3	2,5	1166,4	52,1	10	90	783,89	67,20
25CO01B	21,9	128	3	5,0	560,6	26,1	25	75	300,07	53,52
25CO02B	21,4	141	3	5,0	603,5	26,1	25	75	303,13	50,23
25CO03B	21,5	140	3	5,0	602,0	26,1	25	75	299,38	49,73
25CO01A	21,5	138	3	2,5	1186,8	52,1	25	75	733,17	61,78
25CO02A	21,5	135	3	2,5	1161,0	52,1	25	75	694,87	59,85
25CO03A	21,5	136	3	2,5	1169,6	52,1	25	75	719,38	61,50
100CO01B	21,4	135	3	5,0	577,8	26,1	100	0	379,24	65,63
100CO02B	20,1	138	3	5,0	554,8	26,1	100	0	348,92	62,89
100CO03B	20,6	133	3	5,0	548,0	26,1	100	0	365,76	66,85
100CO01A	21,1	129	3	2,5	1088,8	52,1	100	0	767,86	70,53
100CO02A	21,3	140	3	2,5	1192,8	52,1	100	0	807,64	67,71
100CO03A	21,3	129	3	2,5	1099,1	52,1	100	0	764,75	69,58

A média dos resultados obtidos para a energia de soldagem, calor transferido para a peça e rendimentos térmicos são comparados utilizando o método gráfico nas Figuras 5.1 e 5.2. O objetivo desta comparação é observar qual das misturas de gases tem maior rendimento térmico. Primeiramente comparam-se estes valores para baixa energia de soldagem e, logo após, para alta energia.

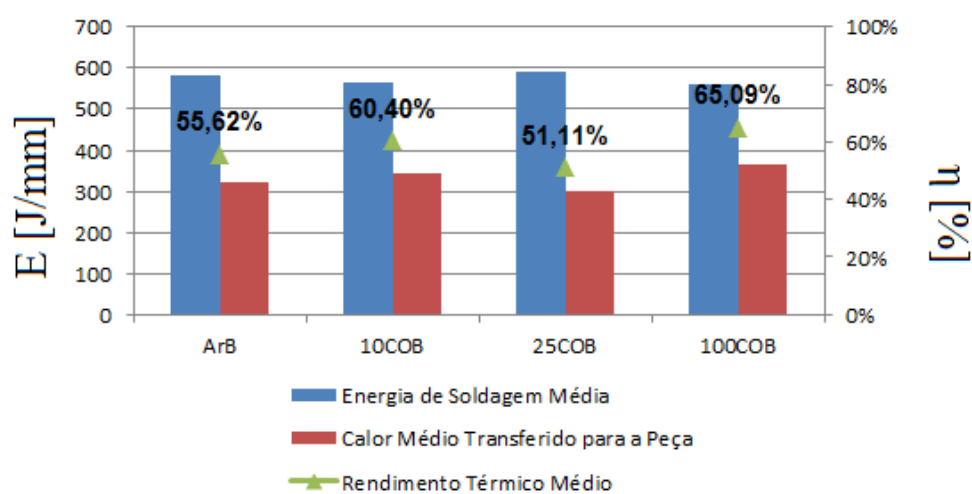


Figura 5.1: Comparação da energia de soldagem, calor transferido para a peça e rendimento térmico para baixa energia de soldagem.

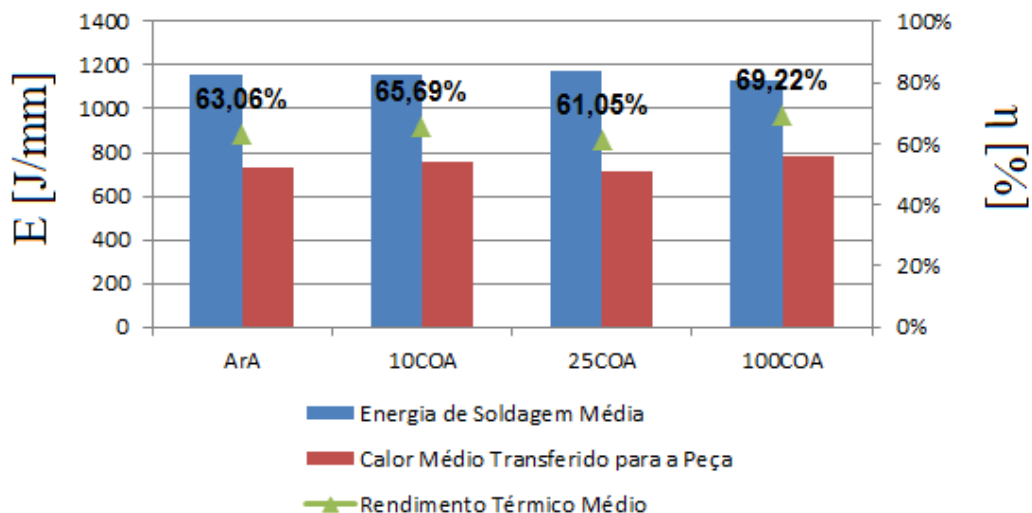


Figura 5.2: Comparação da energia de soldagem, calor transferido para a peça e rendimento térmico para alta energia de soldagem.

Fazendo a análise dos gráficos pode-se perceber que o rendimento térmico aumenta com o aumento da quantidade de CO₂ no gás de proteção, exceto para a mistura contendo 75% de Argônio e 25% de CO₂, que não acompanha a tendência das demais. Tem-se, para as duas energias de soldagem analisadas, um maior rendimento térmico utilizando 100% de CO₂. A média dos rendimentos térmicos para esta mistura é de 65,09% para baixa energia de soldagem e de 69,22% para alta energia. O rendimento térmico mínimo, para os dois níveis de energia de soldagem, foi para a mistura de 75% de Argônio com 25% de CO₂. A média de rendimento térmico para esta mistura foi de 51,10% para baixa energia de soldagem e de 61,05% para alta energia. Utilizando a mistura de 90% de Argônio com 10% de CO₂, foi obtido uma média de rendimento térmico de 60,40% e de 65,69% para baixa e para alta energia de soldagem, respectivamente. Realizando as soldas utilizando gás de proteção com 100% de Argônio, a média de rendimentos térmicos foi de 55,62% para baixa energia de soldagem e de 63,06% para alta energia.

Sabe-se que misturas mais ricas em CO₂ tem maior capacidade de troca de calor e de energia liberada devido a recombinação, transferindo mais energia para o metal base. Por outro lado, estas misturas tem um maior número de curtos circuitos, aumentando o número de salpicos, piorando o aspecto superficial do cordão de solda e o podendo reduzir a quantidade de calor efetivamente transferida.

Para se avaliar o modo de transferência para cada cordão de solda realizado, foi traçado o gráfico de tensão e de corrente para cada um dos testes. Para isto foi utilizado o programa Microsoft Excel. A faixa de tempo escolhida foi de 216ms em todos os gráficos. Desta maneira, é possível observar alguns curtos circuitos.

Todos os gráficos apresentados nas Figuras 5.3 a 5.6 foram retirados da primeira solda com cada mistura (Ar01B, Ar01A, 10CO01B, 10CO01A, 25CO01B, 25CO01A, 100CO01B, 100CO01A). É possível perceber que, para todos os testes, ocorre o modo de transferência por curto circuito. Entretanto, quanto maior a proporção de CO₂ na mistura, maior o número de curtos circuitos.

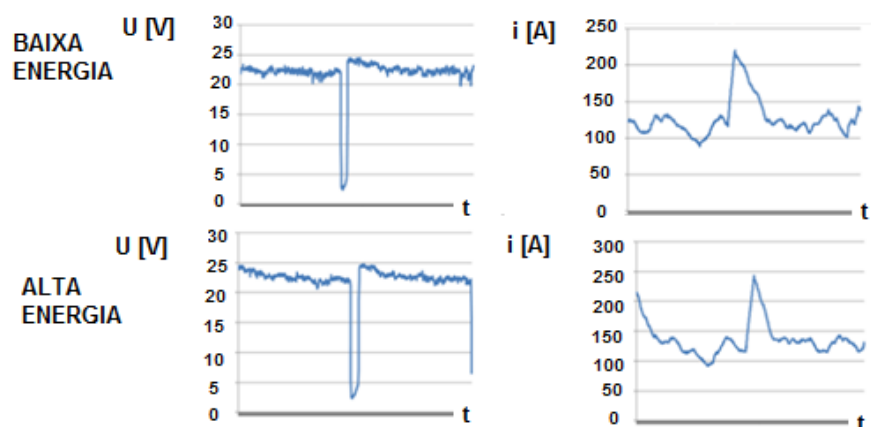


Figura 5.3: Gráficos de tensão e corrente de soldagem mostrando o modo de transferência de curto circuito para o gás de 100% Argônio para baixa e para alta energia de soldagem.

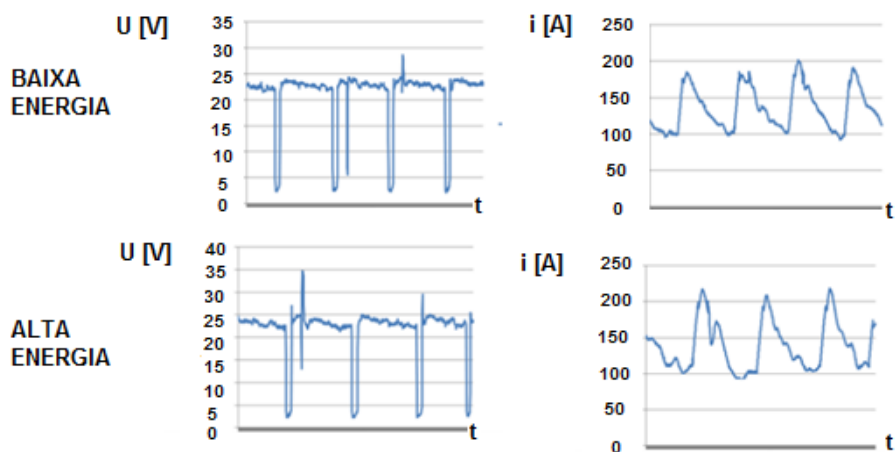


Figura 5.4: Gráficos de tensão e corrente de soldagem mostrando o modo de transferência de curto circuito para o gás de 90% Argônio e 10% CO₂ para baixa e para alta energia de soldagem.

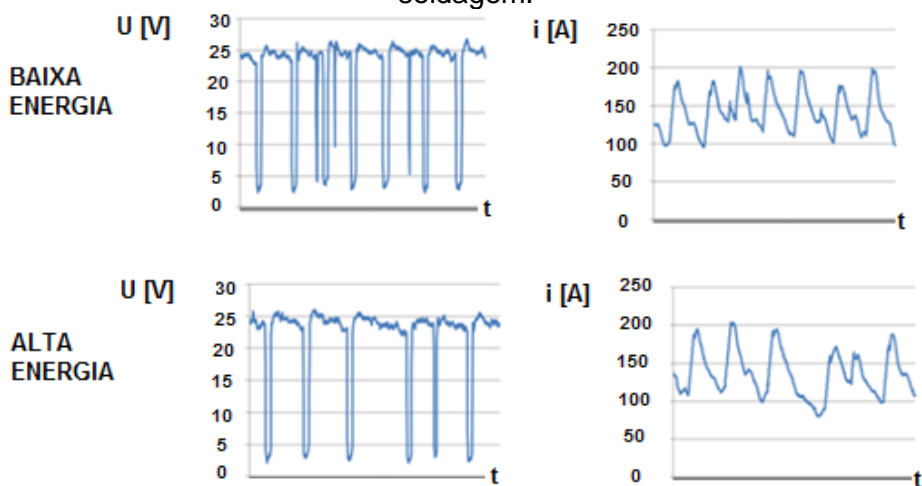


Figura 5.5: Gráficos de tensão e corrente de soldagem mostrando o modo de transferência de curto circuito para o gás de 75% Argônio e 25% CO₂ para baixa e para alta energia de soldagem.

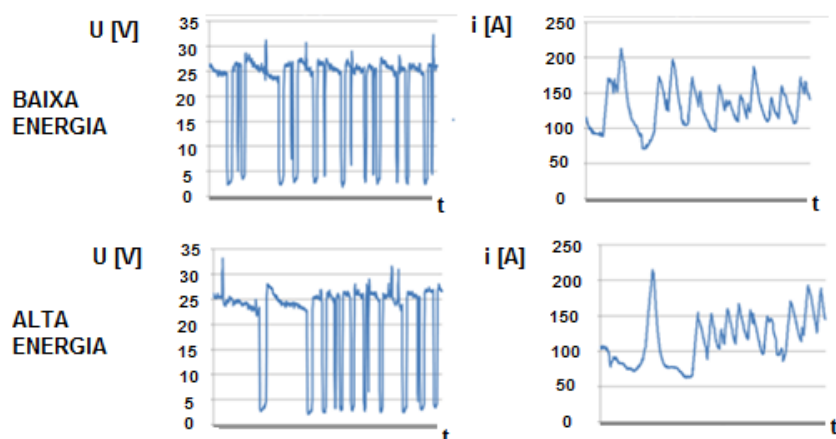


Figura 5.6: Gráficos de tensão e corrente de soldagem mostrando o modo de transferência de curto circuito para o gás 100% CO₂ para baixa e para alta energia de soldagem.

Fazendo a comparação de rendimentos térmicos para energias de soldagem diferentes utilizando o mesmo gás de proteção, mais calor foi transferido para a peça com alta energia de soldagem. A Figura 5.7 compara a média dos rendimentos térmicos para baixa e para alta energia de soldagem.

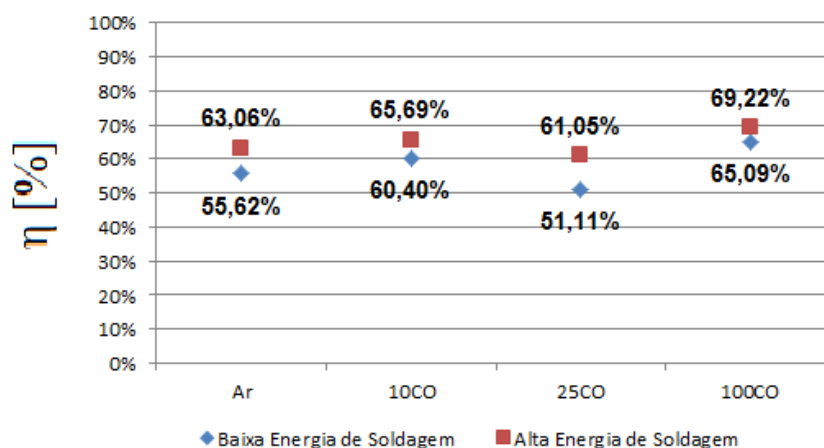


Figura 5.7: Gráfico de comparação entre baixa e alta energia de soldagem.

Para este experimento, se tem menor velocidade para alta energia de soldagem, ou seja, menor velocidade de deslocamento da tocha. Assim, a tocha permanece por mais tempo sobre a mesma região da chapa formando a poça de fusão, proporcionando maior absorção da energia fornecida. Como não foi alterada a corrente e a tensão de soldagem para se aumentar a energia, este é o único parâmetro a ser analisado nesta comparação.

6. ANÁLISE DE INCERTEZAS

Em qualquer experimento ocorrem erros aleatórios na medição das variáveis mesmo utilizando equipamentos precisos e tendo cuidado. Este capítulo tem como objetivo fazer uma análise destes erros de medição ou incertezas.

Os valores de energia de soldagem e de calor absorvido pela peça foram obtidos indiretamente. Para calcular a energia de soldagem, foram utilizados os parâmetros de tensão e de corrente e, para medir o calor absorvido pela peça, foi aferida a temperatura da água.

Conforme encontrado no catálogo de seus fabricantes, os valores de incerteza são de 2% para o amperímetro, de 1% para o voltímetro, de 2% para o tacômetro de pulsos e de 1%

para o termopar tipo T. A incerteza do sistema de medição de vazão da água não pode ser determinada, pois é regulada pelo operador. As calhas, utilizadas para isolar o calor, não são totalmente eficientes, fazendo o calorímetro perder calor para o meio. Outro fator importante a ser analisado é o fato que nem toda a energia transferida para a peça é transferida para a água e, desta maneira, não é medida pelos termopares.

Baseado nos experimentos anteriores de Lu e Kou, 1989; Arévalo, 2011 e Sgarbi, 2013, para a soldagem MIG/MAG, pode ocorrer um erro de até 10% na obtenção do rendimento térmico.

7. CONCLUSÕES

O experimento proposto para análise de rendimento térmico para o processo de soldagem MIG/MAG foi eficiente. O calorímetro não só tem um baixo custo, mas também é de simples operação.

Verificou-se também que o correto isolamento térmico do calorímetro é muito importante para obter bons valores de rendimento térmico. Também é necessário equipamentos com boa precisão na medição de temperaturas, corrente e tensão de soldagem, vazão, etc. A vazão de água no calorímetro deve ser constante e conhecida, pois é um dos fatores de maior importância no cálculo realizado.

Foi observado que o rendimento térmico não aumenta linearmente com o aumento de CO₂ na mistura, pois a mistura contendo Ar+25% CO₂ não segue a tendência das demais e que, para baixas velocidades de soldagem, há maior calor transferido para a peça devido ao maior tempo em que a poça de fusão permanece em uma mesma região do metal base. A não linearidade da relação entre o CO₂ na mistura e o rendimento térmico pode ter ocorrido devido à situação paradoxal em que, quanto maior a quantidade de CO₂ no gás de proteção, maior a troca de calor. Entretanto, quanto maior a quantidade de CO₂ na mistura, maior o número de curtos-circuitos, aumentando a quantidade de salpicos e a instabilidade do arco elétrico.

O método de medição do rendimento térmico por fluxo de água contínuo é simples e eficiente, apresentando boa repetitividade, sendo a máxima variação de 3,79% para os mesmos parâmetros de soldagem.

A média de rendimentos térmicos obtidos nos experimento foi de 61,44%, sendo, em média, 58,13% para baixa energia de soldagem e 64,74% para alta.

A realização do experimento e a análise dos resultados mostrou que é muito importante ter o conhecimento dos parâmetros corretos a serem utilizados para determinada mistura. Nem sempre é vantagem aumentar a quantidade de CO₂ ou energia de soldagem, sendo necessário um estudo prévio para a seleção dos parâmetros de soldagem.

Para trabalhos futuros é proposta a continuação deste estudo, variando uma maior quantidade de parâmetros como tensão e corrente de soldagem, por exemplo e um estudo que permita entender os motivos pelos quais a mistura Ar+25% CO₂ apresentou um comportamento diferente das demais. Também sugere-se analisar o rendimento térmico para outros materiais como alumínio e aços inoxidáveis e para outras espessuras do corpo de prova. Outra possível melhoria seria o uso de um dispositivo mais preciso para medir a vazão de água, como um rotâmetro. Espera-se que este trabalho sirva como ferramenta de aprendizado para futuros estudos na análise de parâmetros que afetam o rendimento térmico.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arévalo, H.D.H. “**Desenvolvimento e Avaliação de Calorímetros via Nitrogênio Líquido e Fluxo Constante (Água) para o Processo de Soldagem**”, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica); Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

American Welding Society, Welding Handbook, “**Welding Processes**” vol. 2, 9th edition, Miami-USA, 2001.

IMC Soldagem & LABSOLDA UFSC, “**Manual do sistema de aquisição de dados SAP v4.01**”, 2005, www.imc-soldagem.com.br, www.labsolda.ufsc.br, Acessados em 04/08/2013.

Incropera, F.; DeWitt, D.; Bergman, T.; Lavine, A.; “**Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**”, LTC, sexta edição, 2008.

Kou, S; Le, S; “**Heat Flow During Autogenous GTA Welding of Pipes**”, Metallurgical Transaction A, v.15, p. 1165-1171, 1984.

Lu, M; Kou, S; “**Power Inputs in Gas Metal Arc Welding of Aluminium**”. Part 2, Welding Journal, v. 68, p. 452s-4562, 1989.

Machado, I. G; “**Soldagem & Técnicas Conexas: Processos**”, 1ª edição, Porto Alegre, 1996.

Scotti, A.; Ponimarev, V.; “**Soldagem MIG/MAG**”, Artliber, 1ª edição, 2008.

Sgarbi, P. “**Construção e Validação de um Calorímetro com Vazão Contínua de Água para Avaliação do Rendimento Térmico em Processos de Soldagem**”, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica); Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

Wan Wylen, G; Sonntag R; Borgnakke C.; “**Fundamentos da Termodinâmica Clássica**”, Edgard Blücher LTDA, 4ª edição, 2008