

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIOGRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS E GEOMETRIA DO CORPO DE PROVA
SOBRE O RENDIMENTO TÉRMICO NA SOLDAGEM DE ALUMÍNIO PELO PROCESSO MIG

por

Henrique de Antoni

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 2014



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS E GEOMETRIA DO CORPO DE PROVA
SOBRE O RENDIMENTO TÉRMICO NA SOLDAGEM DE ALUMÍNIO PELO PROCESSO MIG

por

Henrique de Antoni

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. Dra. Thamy Cristina Hayashi
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. José Antônio E. Mazzaferro

Comissão de Avaliação:

Prof. Dra. Cíntia C. Petry Mazzaferro

Prof. Dr. Ivan G. Machado

Prof. Dr. Tiago Becker

Porto Alegre, 05 de Novembro de 2014.

AGRADECIMENTOS:

Em primeiro lugar quero agradecer ao Prof. Dr. José E. Mazzaferro pelo apoio e o incentivo para a realização deste trabalho.

Quero agradecer também a minha família, especialmente meus pais Romualdo e Sônia e meu irmão Victor pelo amor e incentivo.

Ao mestrando William Haackenhaar e toda a equipe do Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas da UFRGS.

E não posso esquecer também aos meus amigos e colegas pela motivação e a companhia.

ANTONI, H **Avaliação da Influência dos Parâmetros e Geometria do Corpo de Prova sobre o Rendimento Térmico na Soldagem de Alumínio pelo Processo MIG**. 2014. 21. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

RESUMO

A proposta deste trabalho é o estudo da influência da velocidade de soldagem, velocidade de alimentação do arame e comprimento do corpo de prova sobre o aporte de calor e rendimento térmico na soldagem MIG de tubos da liga AA6060-T5. A medição foi realizada com um calorímetro de fluxo contínuo de água construído no Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas da UFRGS (LS&TC). O procedimento experimental consistiu em variar a velocidade de alimentação do arame e a velocidade de soldagem em três níveis e o comprimento do corpo de prova em dois níveis. Os resultados forneceram um rendimento médio de 75,7% para o corpo de prova com 250mm de comprimento e 65,8% para o corpo de prova com 350mm de comprimento. Para um acréscimo na velocidade de alimentação do arame de 5,0 m/min para 6,0 m/min houve um aumento de 3% na eficiência do arco. Foi observado que a eficiência térmica é influenciada pela velocidade de alimentação do arame e o comprimento do corpo de prova considerando um nível de significância de 5%. Dentro do intervalo de parâmetros de soldagem estudado, não observou-se influência significativa da velocidade de soldagem sobre o rendimento térmico.

PALAVRAS-CHAVE: Soldagem MIG/MAG, Alumínio, Eficiência Térmica, Aporte de calor

ANTONI, H. **Influence Evaluation of Parameters and Specimen Geometry on Thermal Efficiency in Aluminum Welding by MIG Process**. 2014. 21. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

ABSTRACT

The main objective of the present work is the study of the influence of welding speed, wire feed speed and specimen length on heat input and thermal efficiency in MIG welding of AA 6060-T5 alloy pipes. The measurements were performed using a continuous water flow calorimeter built at the Laboratory of Welding and Related Techniques (LS&TC-UFRGS). The experimental procedure consists of changing the wire feed speed and welding speed in three levels and the specimen length in two levels. As results, a mean efficiency of 75.7% for 250mm specimen length and 65.8% for 350 mm specimen length. An increase wire feed speed from 5,0 m/min to 6,0 m/min produce an increment of 3% in arc efficiency. The results shown that thermal efficiency is influenced by wire feed speed and specimen length considering a 5% significance level. Considering the range of parameters studied, it was not observed significant influence of welding speed in process thermal efficiency.

KEYWORDS: MIG/MAG Welding, Aluminum, Thermal Efficiency, Heat Input.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	OBJETIVOS.....	1
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
3.1	Processo de Soldagem MIG/MAG.....	1
3.2	Parâmetros de Soldagem.....	1
3.3	Artigos e Trabalhos Anteriores.....	2
3.4	Energia de Soldagem e Rendimento Térmico.....	3
3.5	Perdas de Calor na Soldagem.....	3
3.6	Modos de Resfriamento na Soldagem.....	4
3.7	Experimentos Fatoriais.....	4
3.8	Lei de Propagação de Incertezas de Medição.....	5
4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	5
4.1	Calorímetro e Sistema de Aquisição de Temperatura.....	6
4.2	Corpos de Prova e Calhas de Isolamento.....	7
4.3	Método para o Cálculo do Aporte de Calor.....	7
4.4	Planejamento Experimental.....	8
4.5	Método para o Cálculo da Eficiência Térmica.....	9
4.6	Procedimento para Cálculo da Incerteza do Rendimento Térmico.....	10
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	10
6.	CONCLUSÕES.....	14
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	14

1. INTRODUÇÃO

Dentre os fenômenos relacionados aos processos de soldagem a arco, o aporte de calor possui grande importância porque interfere na qualidade do cordão, geometria da poça de fusão, propriedades mecânicas, físicas e químicas do material, nas distorções e tensões residuais. O aporte de calor é definido como a quantidade de calor que é efetivamente transferida para o metal base por unidade de comprimento linear [Arévalo, 2011]

O rendimento térmico, também chamado de eficiência térmica, ou ainda eficiência do arco é um dado importante no estudo do ciclo térmico da soldagem. Ele é definido como a razão entre a energia efetivamente transferida para o metal base e a energia fornecida pela fonte de soldagem. Existe uma ampla faixa de valores para o rendimento térmico obtidos por diversos autores. De acordo com a AWS, 1991, para a soldagem MIG/MAG a eficiência térmica neste processo pode assumir valores entre 66% a 85%. Isto ocorre tanto devido aos diferentes parâmetros de soldagem adotados para o estudo do fenômeno, quanto pela escolha do material base e a metodologia utilizada para a medição do aporte de calor. Portanto não existe um valor único para o rendimento térmico para um determinado processo, sendo ele dependente dos fatores citados.

2. OBJETIVOS

Este trabalho estuda a influência dos parâmetros de soldagem no rendimento térmico e aporte de calor na soldagem do alumínio. Os parâmetros velocidade de alimentação e velocidade de soldagem foram escolhidos para esse estudo, pois influenciam na produtividade e na energia de soldagem. Também será avaliado como o comprimento do cordão de solda, conseqüentemente o comprimento do corpo de prova, influencia a resposta do rendimento térmico. Seu objetivo é a avaliação do comportamento do calorímetro frente a mudança do comprimento do corpo de prova utilizado, ou seja, investigar se a resposta do aparelho é sensível ao comprimento do corpo de prova na soldagem do alumínio.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Processo de Soldagem MIG/MAG

Segundo American Welding Society, 1991, “soldagem é a operação que visa obter a coalescência das partes ou fusão localizada produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem aplicação de pressão, com ou sem o uso de metal de adição”.

O processo de soldagem MIG/MAG é um processo caracterizado pela geração de calor através de um arco elétrico atuante entre a extremidade de um arame nu consumível, alimentado continuamente, e a peça a ser soldada. O nome do processo está associado ao tipo de proteção gasosa utilizada: gás de proteção inerte, do inglês Metal Inert Gas, MIG, ou mistura de gases ativos com gases inertes, do inglês Metal Active Gas, MAG. A finalidade do gás de proteção é evitar a contaminação da poça de fusão, das gotas de metal fundido e do arame pelos gases atmosféricos, além de contribuir para ionização do arco e sua estabilidade [Machado, 1996].

O processo é dito automático quando o movimento da tocha é realizado automaticamente por uma máquina, como um robô, por exemplo. Quando é realizado manualmente por um operador é dito semi-automático. Os parâmetros como corrente de soldagem, tensão, comprimento do arco e velocidade de alimentação do eletrodo são controlados pela fonte de soldagem. [Scotti, 2008]. Na soldagem do alumínio, por este ser um metal muito reativo utiliza-se os gases inertes Hélio e Argônio ou uma mistura de ambos.

3.2 Parâmetros de Soldagem

A velocidade de soldagem é um parâmetro importante na produtividade, e influencia diretamente a geometria da poça de fusão. Em geral um aumento da velocidade de soldagem provoca menor distorção da peça, zona afetada pelo calor (ZAC) mais estreita, maior refino dos grãos do metal de solda, diminuição das dimensões gerais do cordão e menor penetração [Machado, 1996].

A tensão é um importante parâmetro que influencia o comprimento do arco, a largura do cordão e o modo de transferência do metal fundido (eletrodo) para a poça de fusão. Tensões baixas podem provocar porosidade, sobreposição e cordão estreito e convexo. Do contrário uma tensão alta provoca um acréscimo no comprimento do arco prejudicando sua estabilidade. Nas fontes de potência com curva característica tensão constante utilizadas no processo MIG/MAG, esse parâmetro pode ser controlado diretamente na fonte de soldagem.

A corrente está relacionada com o modo de transferência de metal do eletrodo para a peça. Correntes menores provocam transferência metálica por curto circuito, à medida que a intensidade da corrente é elevada a um determinado valor, o modo de transferência do metal e a taxa de fusão do arame são alterados, resultando uma maior taxa de deposição e penetração. Portanto um acréscimo na intensidade da corrente provoca um aumento na penetração e volume da poça de fusão. A corrente de soldagem está diretamente relacionada com a velocidade de alimentação do arame; um aumento na velocidade de alimentação do arame gera correntes maiores a uma taxa quase linear para o alumínio.

3.3 Artigos e Trabalhos Anteriores

Sgarbi, 2013, realizou experimentos para determinar a eficiência térmica na soldagem MIG/MAG de aço com o mesmo calorímetro utilizado neste trabalho. Ele obteve um rendimento térmico médio de 72,82%. O autor também analisou o efeito da espessura do corpo de prova no rendimento térmico do processo, para isso utilizou dois corpos de provas diferentes, um com 7,5mm de espessura e outro com 16,75mm de espessura. Foi observada uma diferença entre 16 e 38% no rendimento térmico entre os dois corpos de prova, sendo que o menos espesso apresentava maior eficiência térmica.

Bohrer, 2013, estudou a influência do gás de proteção sobre o aporte térmico na soldagem MIG/MAG de aços ao carbono. Utilizando o mesmo equipamento ele obteve um rendimento médio de 69,22% para gás de proteção 100% de CO₂. Para o gás de proteção com uma mistura de 75% de Argônio e 25% de CO₂, obteve um rendimento térmico médio de 51,1%.

Lu e Kou, 1989, realizaram um estudo do rendimento térmico na soldagem MIG em chapas de alumínio com um calorímetro de fluxo contínuo de água, Figura 3.2, e obtiveram uma eficiência do arco média em torno de 80% com o metal de adição ER4043. A Tabela 3.1 mostra os valores dos rendimentos. Outro ponto abordado pelo trabalho dos autores foi a determinação da fração do aporte de térmico que era proveniente da transferência de calor por radiação e convecção. Esta fração correspondeu a 56% do aporte de calor. Já a fração devido à transferência de calor das gotas do metal de adição foi de 29%, enquanto a parcela devido ao calor gerado pelo cátodo foi de apenas 15%.

Tabela 3.1 – Valores de eficiência térmica obtido por Lou e Kou, 1989.

Experimento	1	2	3	4
Corrente (A)	78	128	176	251
Tensão (V)	19,4	22,6	27,8	28,2
Velocidade de soldagem (mm/s)	10,2	10,2	10,2	10,2
Espessura da chapa (mm)	3,2	4,8	6,4	9,5
Rendimento térmico (%)	82,5 ± 1,8	80,8 ± 4,8	80,6 ± 2,0	80,2 ± 1,6

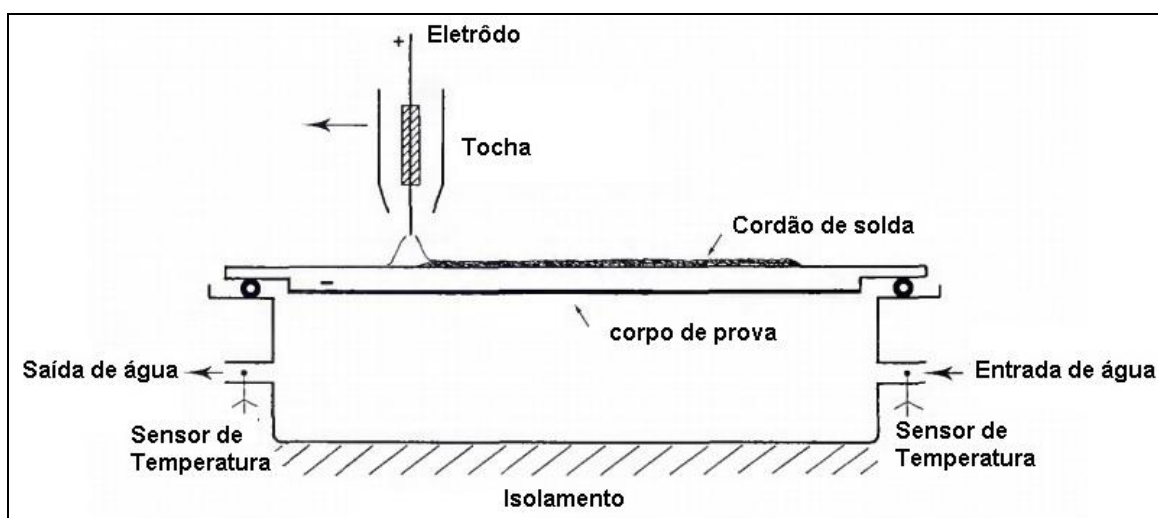


Figura 3.2 Calorímetro de fluxo contínuo de água [Adaptado de Lu e Kou, 1989].

3.4. Energia de soldagem e Rendimento Térmico

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

$$E_S = \eta \frac{U \cdot I}{v} \quad (3.1)$$

Onde E_S é a energia de soldagem [J/mm], U é a tensão de soldagem [V], I é a corrente de soldagem em [A], v é a velocidade de soldagem [mm/s] e η é o rendimento térmico, também designado por eficiência térmica ou eficiência do arco, ele é um número adimensional.

A taxa de transferência de calor que um determinado volume de controle com um fluido incompressível troca com um sistema externo em regime estacionário pode ser calculada pela Equação 3.2 [WanWylen et al., 2008]

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_S - T_E) \quad (3.2)$$

Onde \dot{m} é a vazão mássica [kg/s], C_p é o calor específico do fluido [kJ/kg.K], T_S é a temperatura do fluido na saída do sistema [K], T_E é a temperatura do fluido na entrada do sistema [K]. Neste caso a variação da energia cinética, potencial e o trabalho de escoamento são considerados desprezíveis.

Segundo American Welding Society, 1991, o rendimento térmico que é medido por um calorímetro de fluxo contínuo pode ser obtido pela Equação 3.3.

$$\eta = \frac{\dot{m} \cdot C_p \int_0^\infty (T_S - T_E) \cdot dt}{U \cdot I \cdot t_{sold.}} \quad (3.3)$$

Onde η é o rendimento térmico [%], \dot{m} é a vazão mássica de água que passa pelo calorímetro [kg/s], C_p é o calor específico da água em J/kg.K, T_S e T_E são as temperaturas de saída e entrada da água no calorímetro respectivamente [K], t é o tempo [s], U é a tensão de soldagem [V], I é a corrente de soldagem [A] e $t_{sold.}$ é o tempo de soldagem [s].

3.5 Perdas de Calor na Soldagem

DuPont e Marder, 1995, estudaram a distribuição da energia na soldagem a arco elétrico e apresentaram um modelo que pode ser visualizado na Figura 3.3. Neste modelo a energia proveniente da fonte é gerada no eletrodo e no arco. Parte da energia gerada nessas duas regiões é transferida efetivamente para a peça. Esta parcela é denominada de energia aportada ou calor aportado, a outra parcela de energia é perdida para o meio por convecção e radiação. Também ocorre uma perda considerável de energia devido aos vapores metálicos, respingos de metal fundido que cai longe da peça, gás de proteção que flui para o ambiente e transporta certa quantidade de energia.

A energia que é aportada para a peça é responsável pela fusão do metal base e seu aquecimento. Calor do metal base também é perdido para o meio por radiação e convecção. Porém este calor perdido faz parte do calor aportado para a peça.

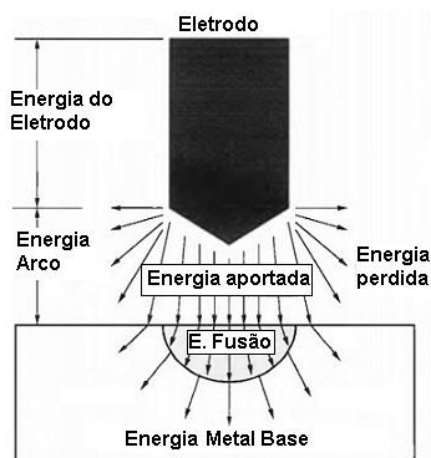


Figura 3.3 Desenho ilustrativo da distribuição de energia. [Adaptado de DuPont e Marder, 1995]

3.6 Modos de Resfriamento na Soldagem

Para fins de descrição da fenomenologia envolvida, existem na literatura três modos de condução de calor na soldagem, os quais estão representados na Figura 3.4. Eles são dependentes da penetração. O modo bidimensional ou 2D ocorre para os casos em que a penetração é total e as isotermas são paralelas a linha de fusão. No modo 2,5D ocorre penetração incompleta, porém com um aquecimento na superfície inferior. O regime de extração é intermediário. No modo tridimensional ou 3D, a superfície inferior da chapa não é aquecida. A fonte de calor é pontual e a remoção de calor ocorre nas três direções.

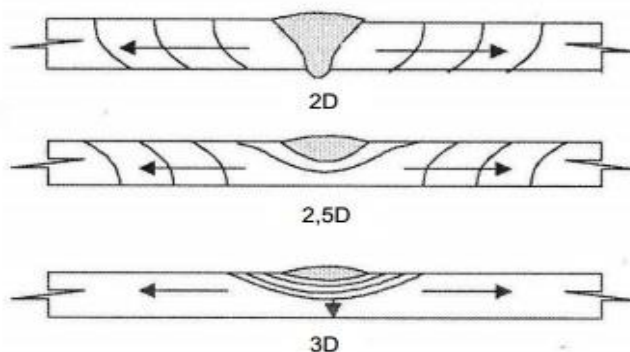


Figura 3.4 - Representação dos modos de extração de calor [Adaptado de Machado, 2000]

3.7 Experimentos Fatoriais

O projeto de experimentos é utilizado para o estudo de desempenho de processos e sistemas. Estes podem ser representados de acordo com a Figura 3.5. Fatores são as variáveis cuja a ação sobre a variável resposta esta sendo estudada no experimento. Os fatores que determinam a resposta de um processo podem ser divididos em controláveis x_1, x_2, \dots, x_p e não controláveis como z_1, z_2, \dots, z_p estes últimos também são conhecidos como ruído. Cada subdivisão de um fator é denominada nível do fator e cada fator pode incluir dois ou mais níveis. Tratamento ou corrida é um experimento que combina cada nível de cada fator. Réplica é o conjunto de todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores que compõem o experimento. [Montgomery, 2011].

O uso de experimentos fatoriais é importante quando se deseja estudar a contribuição de vários fatores na resposta de determinado problema. O efeito principal de um fator é definido como a variação da resposta devido a mudança no nível do fator. Já o efeito de interação entre dois fatores mede a variação na resposta em estudo quando é variado nível de um fator combinado com outro fator.

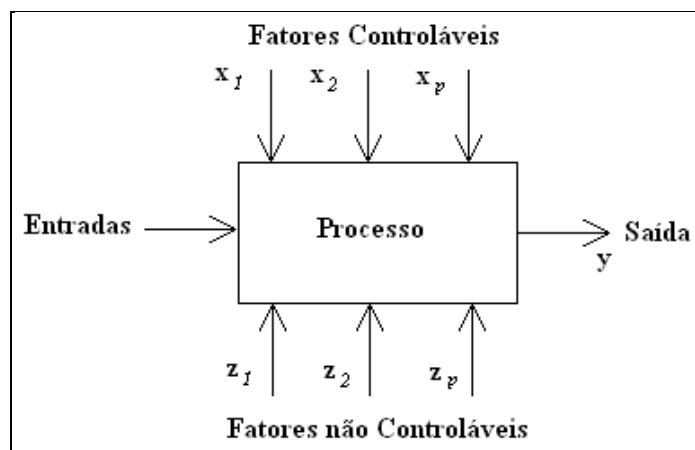


Figura 3.5 – Modelo geral de um processo. [Adaptado de Montgomery, 2011]

3.8 Lei de Propagação da Incerteza de Medição

Segundo o Vocabulário Internacional de Metrologia, 2012, *incerteza da medição* é o parâmetro associado ao resultado de uma medição que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser atribuídos ao *mensurando*. Sendo a estimativa do valor real o resultado de uma medição, o valor do mensurando só é completo quando acompanhado pela incerteza de medição.

Em alguns casos o mensurando Y é medido indiretamente a partir de outras N grandezas X_1, X_2, \dots, X_N pela relação funcional f , como mostra a Equação 3.6:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (3.6)$$

A incerteza padrão combinada de y definida por $u_c(y)$ é obtida pela Lei da propagação de incertezas mostrada na Equação 3.3, onde $u_{x_1}(y), \dots, u_{x_N}(y)$ são as incertezas padrões das grandezas X_1, \dots, X_N respectivamente. [Vuolo, 1998].

$$u_c(y) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 \cdot u^2(x_1) + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_N}\right)^2 \cdot u^2(x_N)} \quad (3.7)$$

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas da UFRGS. Os valores dos aportes de calor medidos nas soldagens foram obtidos de modo indireto. Inicialmente foram medidos valores de temperatura de entrada, temperatura de saída e vazão da água no calorímetro durante o processo de soldagem até o resfriamento completo do corpo de prova. Em seguida a quantidade de calor aportado foi calculada com base nesses três dados.

4.1 Calorímetro e Sistema de Aquisição de Temperatura

Sgarbi, 2013, fez um estudo sobre os tipos de calorímetros utilizados em soldagem e projetou um aparelho de baixo custo e fácil manuseio. O calorímetro desenvolvido por ele foi o mesmo utilizado no presente trabalho. O princípio de funcionamento deste aparelho é por condução e transporte de calor em fluxo contínuo de água. Uma característica interessante deste calorímetro é que ele pode ser acoplado a diversos tamanhos de corpo de prova.

O aparelho possui dois reservatórios de água, um superior e outro inferior. O superior supre água para o sistema, possui capacidade para 100 litros de água e opera com nível de água aproximadamente constante. A vazão é regulada pela válvula de saída do calorímetro; um rotâmetro é conectado ao sistema para medição da vazão. No final do percurso a água é despejada no reservatório inferior, que possui uma bomba que envia a água de volta para o reservatório superior, fechando o ciclo. Na Figura 4.1 pode-se visualizar um esboço dos equipamentos do calorímetro, onde o sentido do escoamento é do item (a) ao item (f), e a conexão é feita através de mangueiras.

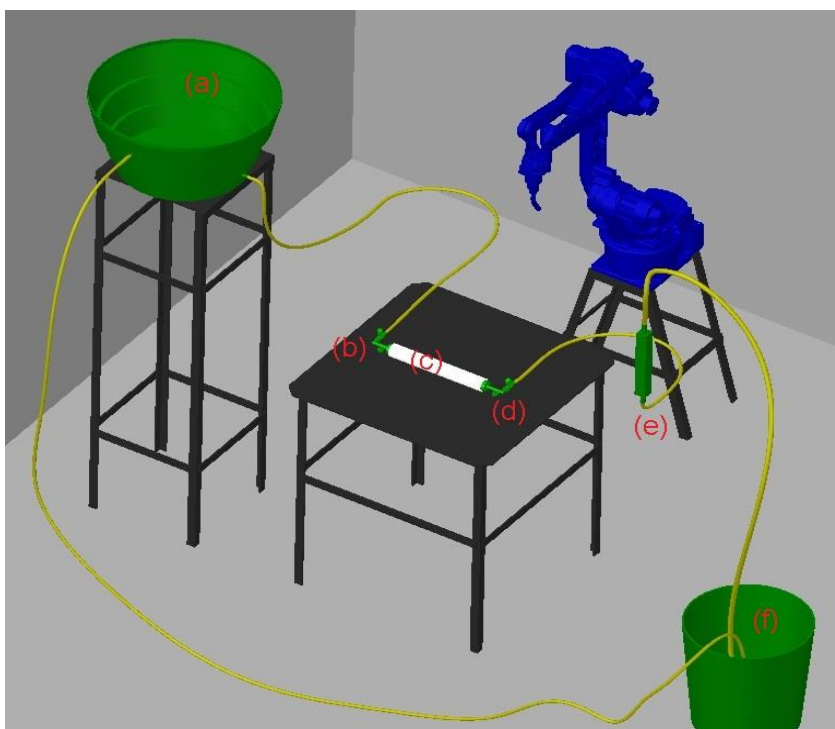


Figura 4.1 – Equipamentos do calorímetro e corpo de prova: (a) reservatório superior, (b) tubulação de entrada de água, (c) corpo de prova, (d) tubulação de saída de água, (e) rotâmetro, (f) reservatório inferior.

As medições das temperaturas são feitas através de termopares instalados nas tubulações de entrada e saída de água. Essas tubulações são conectadas nas extremidades

do corpo de prova através de rolhas de borracha butílica. Foram dispostos quatro termopares tipo “T”, dois em ligação diferencial, e os outros dois em ligação comum. Estes sensores apresentam faixa de operação de -270°C e 400°C, sensibilidade de 50µV/°C e limite de erro de ± 1°C [Thermomax, 2014]. Eles estão ligados a um módulo de aquisição de dados NI-9214. O módulo é conectado ao chassi NI cDAQ-9184. Ambos os aparelhos são fabricados pela National Instruments. Também foi criado um programa em LabView que executa a leitura das temperaturas nos termopares e salva os valores em uma planilha no instante determinado pelo usuário. Para este trabalho foi seguida a recomendação de Sgarbi, 2013, e utilizada uma vazão de água do sistema de 2 l/min. O rotâmetro possui incerteza de ±2% do fundo de escala.

4.2 Corpos de Prova e Calhas de Isolamento

Os corpos de prova são tubos sem costura da liga de alumínio AA6060-T5 com 63,5mm de diâmetro e 6,35mm de espessura de parede. Neste trabalho, foram projetados dois comprimentos de corpos de prova, 350 e 450 mm. Em suas extremidades foram soldadas chapas com a finalidade de permitir a conexão do cabo terra da fonte de soldagem. No final de cada processo de soldagem foram utilizadas duas calhas de isolamento. Cada calha é feita de PVC e possui uma camada de cortiça de 2 mm. A Figura 4.2 mostra o corpo de prova e as calhas de isolamento.

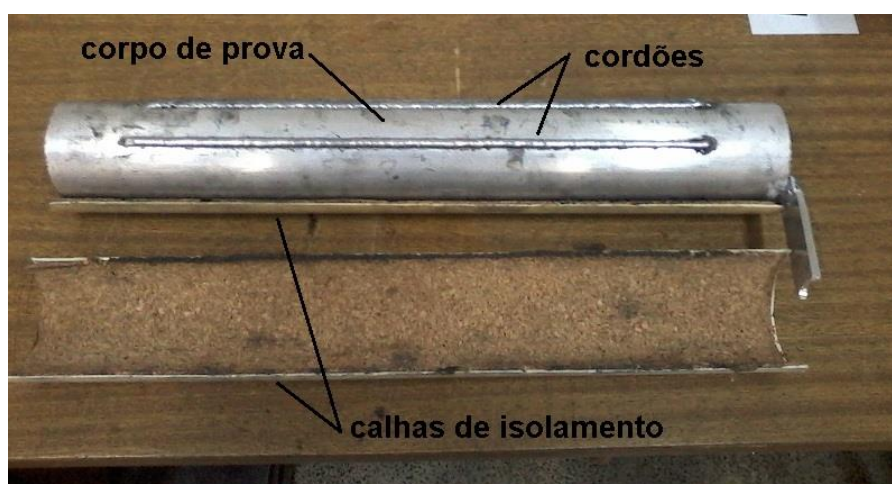


Figura 4.2 – Corpo de prova de 350mm de comprimento e 63,5mm de diâmetro e calhas de isolamento.

4.3 Método para o Cálculo do Aporte de Calor

Como citado anteriormente, existem termopares posicionados na entrada e saída da água que circula no corpo de prova (entrada e saída do calorímetro). Durante a soldagem, a água que passa através do tubo de alumínio é aquecida. As temperaturas de saída, entrada e diferencial são adquiridas e gravadas em um arquivo para posterior análise. Esta diferença de temperatura é gravada em uma planilha. O intervalo de aquisição foi fixado em 0,1s. Com a equação 4.1 pode-se calcular a quantidade de calor que é efetivamente transferida para peça.

$$Q_a = \sum_{i=1}^n \dot{V} \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_s - T_E) \cdot \Delta t \quad (4.1)$$

No qual \dot{V} é a vazão da água medida pelo rotâmetro [m³/s], ρ é a massa específica da água [kg/m³], C_p é o calor específico da água [J/kg.K], T_s é a temperatura de saída do calorímetro [°C], T_E é a temperatura de entrada do calorímetro [°C] e Δt é o intervalo de

aquisição [s]. O tratamento dos dados foi feito através do software Microsoft Office Excel. Foram eliminados os pontos antes da execução da soldagem e após a estabilização da temperatura dos corpos de prova. O critério utilizado para o encerramento do monitoramento dos dados foi estipulado em 20 segundos após o instante em que a diferença de temperatura dos termopares de saída e entrada fosse menor que 25% do erro do sensor, ou menor do que 0,25°C. A Figura 4.3 exemplifica o tratamento de dados.

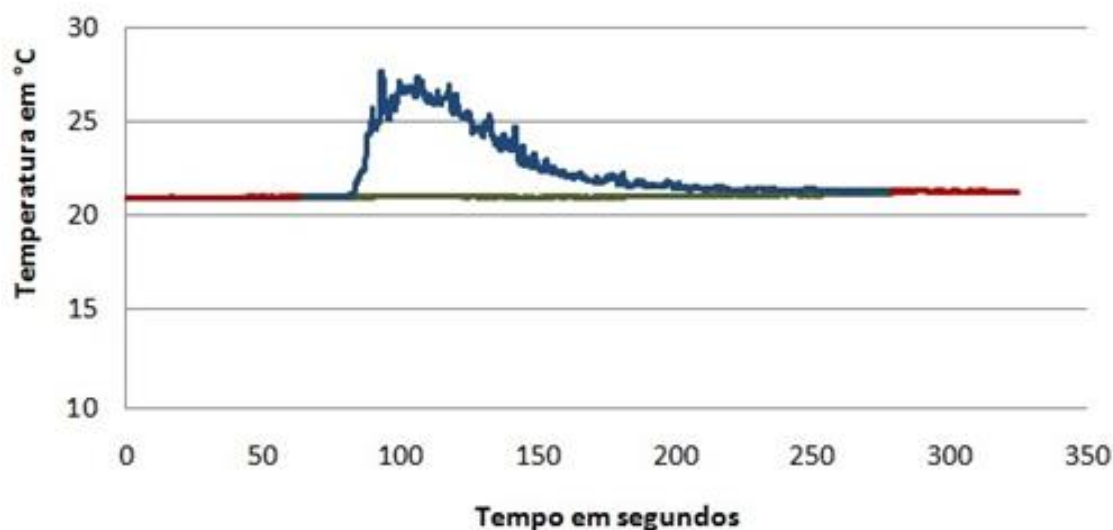


Figura 4.3 – Tratamento de dados das temperaturas dos termopares. A linha em azul é a temperatura da água na saída, a cor verde é a temperatura na entrada, o trecho na cor vermelha são os intervalos de valores descontados do cálculo do rendimento térmico.

4.4 Planejamento Experimental

Como mencionado anteriormente, os fatores analisados foram comprimento do cordão de solda, velocidade de soldagem e velocidade de alimentação do arame. Na Tabela 4.2 encontra-se um esboço do planejamento experimental proposto. Todos os outros fatores não incluídos nela foram constantes.

Tabela 4.2 – Planejamento experimental para avaliação do rendimento térmico do processo MIG do alumínio.

Lc [mm]	250									350								
Va [m/min]	5,0			5,5			6,0			5,0			5,5			6,0		
I _m [A]	133			147			163			133			147			163		
Vs [mm/s]	8	10	12	8	10	12	8	10	12	8	10	12	8	10	12	8	10	12

Para o comprimento foram escolhidos os níveis de 250 mm e 350mm. Quanto a velocidade de soldagem foram escolhidos os níveis de 8 mm/s, 10 mm/s e 12 mm/s. E para a velocidade de alimentação foram determinados os níveis de 5 m/min, 5,5 m/min e 6 m/min. Estes parâmetros de soldagem estão dentro da faixa indicada para a soldagem do arame ER4043 de 1,2 mm de bitola e metal base com 6,35 mm de espessura [ALCAN, 1993] e foram definidos após uma série de experimentos testando diferentes parâmetros e verificando os limites mínimo (que permitiam a deposição do cordão de solda) e máximo (que não produzia perfuração no corpo de prova durante a operação). Foram realizadas duas réplicas do experimento, totalizando 36 corridas.

O sistema robotizado para realizar a soldagem é formado pelo robô Motoman MA1400 da Yaskawa. O robô possui 6 graus de liberdade e suas juntas possuem velocidade angular máxima de 200°/s até 610°/s. Sua repetitividade é de $\pm 0,08$ mm. Na extremidade do robô está acoplado o manipulador iCAT e a tocha Robô WH, ambos da AbicorBinzel. Estes aparelhos podem ser vistos na Figura 4.4.



Figura 4.4 – (a) Robô Motoman MA1400, (b) Manipulador iCAT e (c) Tocha Robô WH.

A fonte utilizada durante os experimentos foi a SynergicPuls 4000R, que é dotada de painel digital, controle por microprocessador e pode regular os parâmetros de soldagem conforme o diâmetro e material do arame que será soldado. Ela acompanha o alimentador VR 1500 4R/W/E. Ambos são fabricados pela Fronius.

O módulo de aquisição do sinal da tensão e corrente do arco foi o SAP v 4.01 da marca IMC Soldagem. A frequência de aquisição de dados utilizada foi de 5kHz com uma conversão de sinal analógico/digital de 10 bits. O erro aleatório da medição da tensão e corrente é de $\pm 1\%$ e $\pm 2\%$ respectivamente [IMC Soldagem, 2014]. Neste trabalho foram medidos pelo sistema apenas tensão e corrente. Os demais parâmetros como velocidade de alimentação do arame e vazão do gás de proteção foram constantes.

Os corpos de prova foram soldados pelo processo MIG com corrente contínua. Para a proteção da poça de fusão e do arco elétrico foi utilizado o gás de proteção Argônio 100% com vazão de 18l/min. A distância bico de contato peça foi fixada em 20 mm. As peças foram soldadas com um ângulo de ataque positivo (empurrando) de 15°. Os cordões de soldas foram depositados sobre o tubo “bead-on-pipe”, uma vez que o objetivo foi apenas a medição do aporte de calor no processo. O sentido da soldagem foi realizado no sentido do fluxo da água e na posição longitudinal do tubo, com início e fim dos cordões de solda 50 mm das extremidades. A tensão de soldagem foi fixada em 21 V.

4.5 Método para Cálculo da Eficiência Térmica

A fórmula utilizada para o cálculo da energia proveniente da fonte, E_f [J/mm], está descrita na Equação 4.2 a seguir.

$$E_f = \frac{I_m U_m}{v_s} \quad (4.2)$$

Onde I_m é a corrente média [A], U_m é a tensão média [V], v_s é a velocidade de soldagem [mm/s] [Scotti, 2008].

A eficiência térmica, η [%], foi calculada pela Equação 4.3, Q_a é o calor aportado [J], E_f é a energia proveniente da fonte [J/mm] e L_c é o comprimento do cordão de solda [mm] [Machado, 1996].

$$\eta = \frac{Q_a}{E_f \cdot L_c} \quad (4.3)$$

4.6 Procedimento para Cálculo da Incerteza do Rendimento Térmico

A incerteza de medição do aporte de calor u_{Q_a} [J] foi calculada pela Equação 4.4. descrita a seguir.

$$u_{Q_a} = \Delta t \cdot \rho \cdot C_p \cdot \sqrt{\sum ((T_{s_i} - T_{e_i})^2 \cdot u_{\dot{V}}^2 + 2 \cdot \dot{V}^2 \cdot u_T^2)} \quad (4.4)$$

Onde Δt é o intervalo de medição dos sensores de temperatura [s], ρ é a massa específica da água [kg/m³], C_p é o calor específico da água [J/kg.K], T_s é a temperatura medida pelo termopar de saída da água [°C], T_e é a temperatura medida pelo termopar de entrada de água [°C], \dot{V} é a vazão medida pelo rotâmetro [m³/s], $u_{\dot{V}}$ é a incerteza de medição do rotâmetro [m³/s], u_T é a incerteza de medição dos termopares [°C].

A incerteza de medição da energia proveniente da fonte foi calculada pela Equação 4.5.

$$u_{E_f} = \sqrt{\frac{I_m^2 u_U^2 + U_m^2 u_I^2}{v^2}} \quad (4.5)$$

Onde u_{E_f} é a incerteza da medição da energia proveniente da fonte [J/mm], I_m é o valor médio medido da corrente de soldagem [A], U_m é o valor médio obtido na medição da tensão de soldagem [V], u_U é a incerteza de medição da tensão [V], u_I é a incerteza de medição da corrente [A]. O cálculo da incerteza de medição do rendimento foi obtido através da Equação 4.6.

$$u_\eta = \sqrt{\left(\frac{u_{Q_a}}{L_c \cdot E_f}\right)^2 + \left(-\frac{Q_a u_{E_f}}{L_c \cdot E_f^2}\right)^2} \quad (4.6)$$

Onde Q_a é o calor aportado [J], L_c é o comprimento do cordão de solda [mm], E_f é a energia proveniente da fonte [J/mm], u_{E_f} é a incerteza de medição da fonte [J/mm], u_{Q_a} é a incerteza de medição do aporte de calor [J], u_η é a incerteza de medição do rendimento térmico [adim.].

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os dados obtidos do rendimento térmico e suas análises. Após a execução dos experimentos foi calculada a eficiência térmica e sua incerteza que se encontra na Tabela 5.1. Na mesma tabela, L_c é o comprimento do cordão, v_a é a velocidade de alimentação do arame, v_s é a velocidade de soldagem, U é a tensão de soldagem, I é a corrente de soldagem, E_f é a energia fornecida pela fonte, Q_a é a energia imposta e η é a eficiência térmica. Na última coluna está a ordem da corrida mostrando que o

experimento foi realizado aleatoriamente. Para cada combinação de fatores houveram duas amostras realizadas.

Tabela 5.1 Valores obtidos para o rendimento térmico, de acordo com os parâmetros de soldagem utilizados.

L_c (mm)	v_a (m/min)	v_s (mm/s)	U (V)	I (A)	E_f (J/mm)	Q_a (J/mm)	η (%)	ordem da corrida
250	5	8	20,9	133,4	348,5	258,9	$74,3 \pm 2,0$	6
			20,8	133,6	347,4	248,7	$71,6 \pm 1,8$	17
		10	21,0	132,9	279,1	213,5	$76,5 \pm 2,0$	30
			20,9	133,3	278,6	199,2	$71,5 \pm 1,8$	3
		12	20,9	133,4	232,3	169,8	$73,1 \pm 2,0$	16
			20,9	133,0	231,6	172,3	$74,4 \pm 2,0$	28
	5,5	8	21,0	147,0	385,9	296,7	$76,9 \pm 1,9$	20
			21,2	147,4	390,6	280,5	$71,8 \pm 1,7$	33
		10	21,1	147,1	310,4	227,2	$73,2 \pm 1,9$	21
			21,0	147,0	308,7	236,5	$76,6 \pm 1,9$	31
		12	20,9	147,0	256,0	194,3	$75,9 \pm 2,0$	22
			21,0	147,0	257,3	188,3	$73,2 \pm 2,0$	23
	6	8	21,1	163,7	431,8	332,9	$77,1 \pm 1,9$	7
			21,1	163,8	432,0	311,9	$72,2 \pm 1,7$	13
		10	21,0	163,2	342,7	258,1	$75,3 \pm 1,9$	12
			21,1	162,8	343,5	271,0	$78,9 \pm 2,0$	2
		12	21,1	162,4	285,6	222,7	$78,0 \pm 1,9$	4
			21,0	163,2	285,6	217,6	$76,2 \pm 2,0$	34
350	5	8	21,0	133,1	349,4	225,4	$64,5 \pm 1,5$	8
			20,9	132,9	347,2	225,7	$65,0 \pm 1,5$	26
		10	20,9	133,2	278,4	172,9	$62,1 \pm 1,6$	9
			20,8	133,6	277,9	171,7	$61,8 \pm 1,6$	32
		12	20,9	132,5	230,8	147,5	$63,9 \pm 1,7$	18
			20,8	133,3	231,1	141,9	$61,4 \pm 1,6$	19
	5,5	8	21,0	147,1	386,1	278,0	$72,0 \pm 1,7$	1
			21,1	147,0	387,7	250,5	$64,6 \pm 1,6$	10
		10	21,0	147,1	308,9	190,6	$61,7 \pm 1,7$	25
			21,1	146,7	309,5	194,7	$62,9 \pm 1,6$	29
		12	21,0	147,2	257,6	160,7	$62,4 \pm 1,7$	35
			20,9	146,8	255,7	163,6	$64,0 \pm 1,7$	36
	6	8	21,0	162,8	427,4	312,4	$73,1 \pm 1,8$	11
			21,1	162,6	428,9	283,0	$66,0 \pm 1,7$	24
		10	21,1	163,1	344,1	232,3	$67,5 \pm 1,6$	5
			21,2	163,0	345,6	216,7	$62,7 \pm 1,7$	15
		12	21,1	162,9	286,4	193,3	$67,5 \pm 1,7$	14
			21,1	163,2	287,0	180,8	$63,0 \pm 1,6$	27

Na mesma tabela pode-se notar que a corrente aumentou com o acréscimo da velocidade de alimentação do arame. Com velocidade de 5,0 m/min a corrente de soldagem foi de aproximadamente 133 A, com 5,5 m/min a corrente foi próxima a 147 A e com a velocidade de 6,0 m/min a corrente foi cerca de 163 A. Já a tensão esteve aproximadamente constante na faixa entre 20,8 e 21,2 V. Também pode-se observar que a incerteza na medição do rendimento térmico foi em média de $\pm 1,9\%$.

Os resultados obtidos foram analisados estatisticamente com análise de variância para cada um dos parâmetros propostos no planejamento fatorial. Considerou-se que o fator avaliado teve influência quando o nível de significância “valor P” fosse igual a 0,05 ou menor que este valor. Na Tabela 5.2 pode-se notar que os principais parâmetros que influenciaram na resposta foram o comprimento do cordão e a velocidade de alimentação do arame.

Tabela 5.2 – Análise de variância dos fatores sobre o rendimento. Onde Lc é o comprimento do cordão, Vs é a velocidade de soldagem e Va a velocidade de alimentação do arame.

Fonte	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Média Quadrática	Estatística de teste (Fo)	Valor P
Lc	1	906,01	906,01	117,28	0,000
Vs	2	16,75	8,376	1,08	0,359
va	2	59	29,501	3,82	0,041
Lc*Vs	2	58,7	29,351	3,8	0,042
Lc*va	2	0,97	0,483	0,06	0,940
Vs*va	4	5,39	1,347	0,17	0,949
Lc*Vs*va	4	4,59	1,148	0,15	0,961
Erro	18	139,05	7,725		
Total	35	1190,46			
Coeficiente de determinação $R^2 = 88,3\%$					

A Figura 5.1 mostra o gráfico dos efeitos médios do comprimento do cordão sobre o rendimento. Pode-se observar que o comprimento do cordão de solda foi um fator preponderante no rendimento. As amostras com comprimento de 250 mm tiveram rendimento em média de 74,7 % enquanto que nas amostras de 350 mm tiveram rendimento em média de 64,8%, uma diferença de 9,9%. Pode-se supor que essa diferença ocorre devido ao maior tempo de exposição durante a soldagem do cordão, para o comprimento maior, o que aumenta as trocas de calor por convecção e radiação com o ambiente. Este calor que é perdido não pode ser computado pelo calorímetro, indicando que o sistema possui uma desvantagem nesse aspecto. Portanto a questão do isolamento é fundamental para a correta medição do rendimento.

Os valores de rendimento obtidos para a soldagem MIG do alumínio foram menores do obtido por Lu e Kou, 1989. Se for considerada somente a média da eficiência térmica obtida no comprimento de 250 mm, no presente trabalho ficou com 74,7%, enquanto que os autores citados observaram um rendimento médio de 80%. Se comparado com os resultados obtidos por Sgarbi, 2012, e Bohrer, 2013, o alumínio mostrou possuir rendimento térmico superior ao aço. Uma vez que os autores citados obtiveram 72,82% e 69,22% respectivamente. Uma das explicações para essa diferença pode ser devido a condutividade térmica maior do alumínio se comparada com a mesmas propriedade para o aço.

O efeito do aumento da velocidade de alimentação do arame no rendimento mostrou-se significativo como pode ser vista no gráfico da Figura 5.2. Pode-se notar que o rendimento cresce com o aumento da velocidade de alimentação, para a faixa estudada. No gráfico houve um aumento de 3% no rendimento entre as velocidades de 5,0 m/min e 6,0 m/min. Tal

mudança ocorre devido ao acréscimo da intensidade da corrente que induziu um aumento na penetração do cordão. Uma análise dos corpos de prova após a realização das soldas evidenciou que não houve penetração completa, porém o modo de extração de calor que foi intermediário tende ao bidimensional devido a esse acréscimo da penetração, dessa forma aumenta o fluxo de calor para a superfície do tubo, assim fornecendo mais energia para o corpo de prova. Efeito semelhante também foi observado por Arévalo, 2011, na soldagem GMAW goticular do aço no qual um aumento na velocidade de alimentação provocou um acréscimo na eficiência do arco.

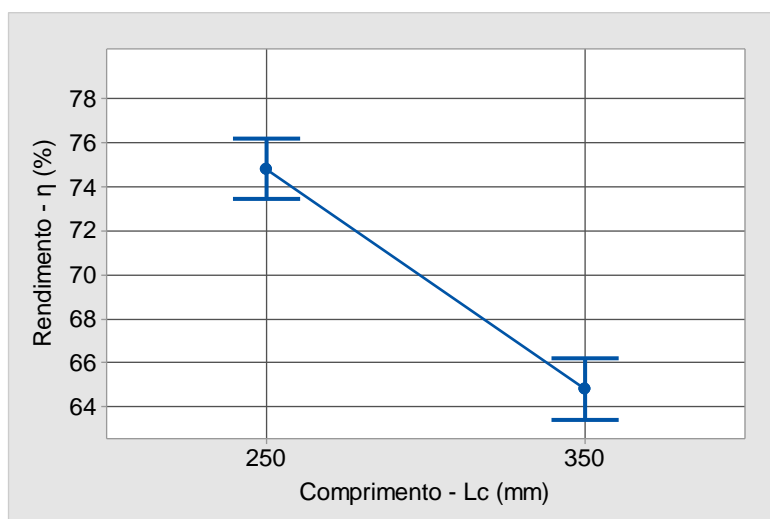


Figura 5.1 – Efeito do comprimento sobre o rendimento.

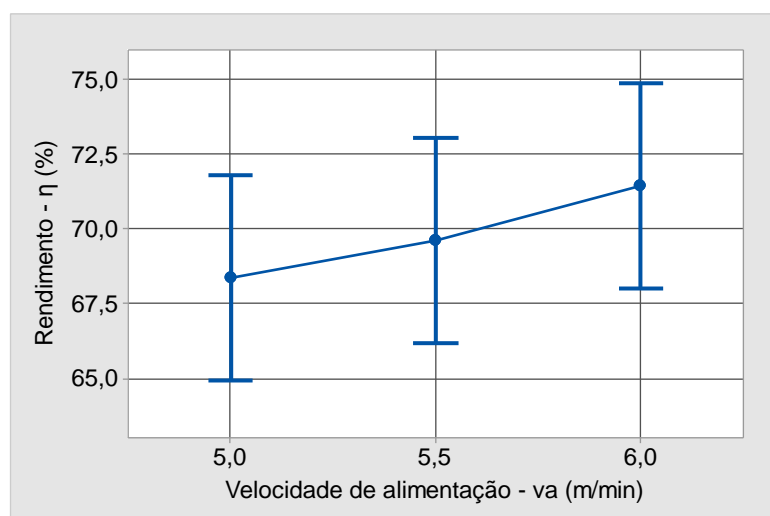


Figura 5.2 – Efeito da velocidade de alimentação sobre o rendimento.

Na Figura 5.3 encontra-se o gráfico da influência da velocidade de soldagem sobre o rendimento. A velocidade de 8mm/s produziu um rendimento médio de 70,8%. Para as velocidades de 10mm/s e 12mm/s os rendimentos médios foram de 69,2% e 69,4% respectivamente. Embora o gráfico apresente valores médios do rendimento menores nas velocidades de 10mm/s e 12mm/s, a análise da variância mostrou que dentre os fatores testados, este foi o único fator que não influenciou significativamente nos resultados, para a faixa de velocidades estudada. Embora velocidades menores resultem em tempo de execuções maiores e conseqüentemente mais exposição do cordão ao ambiente, deve-se considerar que o efeito da penetração também pode estar influenciando a resposta, uma vez que penetração é inversamente proporcional a velocidade de soldagem. Arévalo, 2011, também obteve resultado

semelhante para o efeito da velocidade de soldagem no rendimento térmico na soldagem GMAW de aços, no qual não houve influência no rendimento e este foi aproximadamente constante.

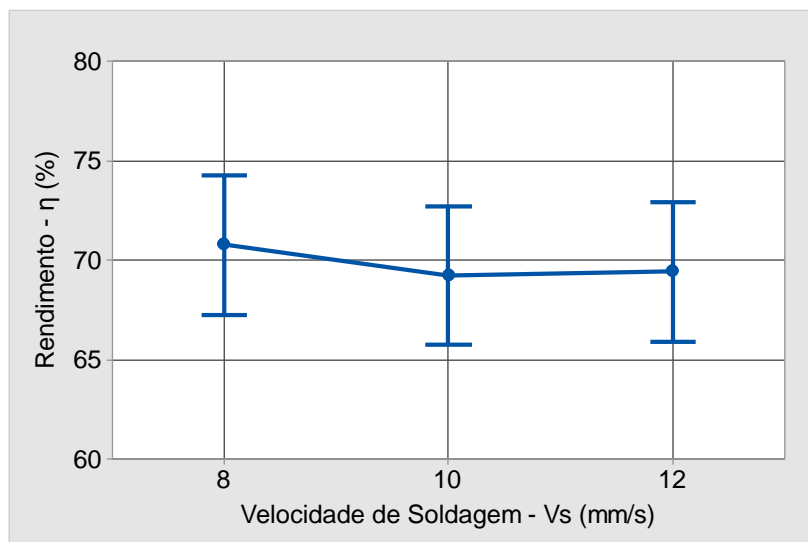


Figura 5.3 – Efeito da velocidade de soldagem sobre o rendimento.

6. CONCLUSÕES

No presente trabalho pode-se observar que houve maior influência do comprimento do corpo de prova sobre a resposta do rendimento térmico obtida pelo calorímetro. Entre os dois comprimentos utilizados foi reportada uma diferença de cerca de 10% com valor máximo para o comprimento menor. Portanto para esse tipo de calorímetro e material base estudado, a resposta do rendimento é sensível ao tamanho do corpo de prova, restringindo seu uso às amostras de comprimentos menores.

A velocidade de alimentação do arame interfere no aporte de calor e o rendimento térmico conforme descrito na literatura e pode ser comprovada neste trabalho a um coeficiente de segurança de 95%. Foi encontrado um aumento de 3% na média do rendimento alterando a velocidade de alimentação de 5 m/min para 6 m/min. Não houve influência significativa da velocidade de soldagem sobre o rendimento térmico considerando um nível de significância de 5%, para a faixa de velocidades estudadas.

O método para medição do rendimento térmico por fluxo de água contínuo é simples e eficiente, o aparelho mostrou-se preciso apresentando incerteza na medição média de aproximadamente $\pm 1,9\%$ do rendimento.

O metal de base interfere de forma direta na eficiência térmica conforme pode ser observado no presente trabalho e comparado com os trabalhos de Sgarbi, 2012 e Bohrer, 2013.

Para futuros trabalhos é proposto um estudo mais aprofundado sobre os motivos que levaram a velocidade de soldagem não interferir na eficiência térmica. Também se sugere incluir mais parâmetros como tensão de soldagem ou DBCP.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcan, “**Manual de Soldagem, Alcan Alumínio do Brasil S/A**”, 1993, 1ª Edição.

American Welding Society, Welding Handbook, “**Welding Technology**” vol. 2, 8th edition, Miami-USA, 1991.

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

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

DuPont, J. N.; Marder, A. R. Thermal Efficiency of Arc Welding Process, “**Welding Journal**”, v.74, p.406s-416s, 1995.

Fronius. “**TransPulsSynergic 4000**”. Disponível em :<<http://www.fronius.com>>. Acesso em: 07 de outubro de 2014.

IMC Soldagem. “**Manual do Sistema SAP – V 4.01**”. Disponível em: <<http://www.imc-soldagem.com.br>>. Acesso em: 01 de outubro de 2014.

Lu, M. J.; Kou, S. Power Inputs in Gas Metal ArcWeldingofAluminum – Part 2, “**WeldingJournal**”, v. 68, p. 452s-456s, 1989

Machado, I. G. “**Soldagem e Técnicas Conexas: Processos**”. Ivan Guerra Machado, Porto Alegre, 1996.

Machado, I. G. “**Condução de Calor na Soldagem: Fundamentos & Aplicações**”, Editora Livre, 2000

Montgomery, D.C.; Runger G. C. “**Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros – 5ª edição**”, LTC, 2011.

Scotti, A., Ponimarev, V.; “**Soldagem MIG/MAG**” Artilber, 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.

Thermomax. “**Catálogo de Produtos Thermomax – Termopares**”. Disponível em: <<http://www.thermomax.com.br>>. Acesso em: 25 de setembro de 2014.

VIM, “**Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012)**”, Duque de Caxias, RJ : INMETRO, 2012.

Vuolo, J.H. “**Fundamentos da Teoria de Erros**”, Editora Edgard Blucher, São Pulo, 1998.

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