



Universidade Federal de Uberlândia  
Faculdade de Engenharia Mecânica  
Graduação em Engenharia Mecânica

Avaliação da influência da vazão de água nos valores da eficiência térmica  
obtidos pelo calorímetro de fluxo contínuo de água

Pedro Henrique da Cunha Pinto

Uberlândia

2018

Universidade Federal de Uberlândia  
Faculdade de Engenharia Mecânica  
Graduação em Engenharia Mecânica

Avaliação da influência da vazão de água nos valores da eficiência térmica  
obtidos pelo calorímetro de fluxo contínuo de água

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

Uberlândia

2018

**Banca examinadora:**

---

Prof. Volodymyr Ponomarov  
Universidade Federal de Uberlândia

---

Prof. Douglas Bezerra de Araújo  
Universidade Federal de Uberlândia

---

Me. Diego Costa  
Universidade Federal de Uberlândia

## **Resumo**

O objetivo do presente trabalho foi avaliar a influência da vazão de água na capacidade de um calorímetro de fluxo contínuo capturar calor absorvido pela água. O trabalho consistiu em testes de um calorímetro com uma resistência elétrica acoplada ligada a uma fonte de soldagem com a característica estática de corrente constante, variando vazões de água e observando valores do calor absorvido com o cálculo posterior da eficiência térmica do sistema. Foram avaliadas um total de cinco vazões, usando os mesmos parâmetros de potência (produto tensão x corrente). Observou-se que a medida de aumento da vazão de água a eficiência térmica do sistema (calor capturado e mensurado) foi cada vez maior, ou seja, as perdas pelo calorímetro da energia fornecida pela resistência elétrica foram cada vez menores, chegando a uma saturação por volta de 95,42 %, obtido pela vazão de 4,8 l/min (maior vazão).

**Palavras-chave:** Calorímetro, Eficiência térmica, Vazão de água.

## **Abstract**

The objective of the present work was to evaluate the influence of water flow on the ability of a continuous flow calorimeter to capture heat absorbed by water. The work consisted in tests of a calorimeter with a coupled electrical resistance connected to a welding source with the static characteristic of constant current, varying water flows and observing values of absorbed heat with the later calculation of the thermal efficiency of the system. A total of five flows were evaluated, using the same power parameters (product voltage x current). It was observed that the measure of increase of the water flow the thermal efficiency of the system (captured and measured heat) was increasing, that is, the calorimeter losses of the energy provided by the electrical resistance were getting smaller, reaching a saturation around 95.42%, obtained by the flow of 4.8 l / min (higher flow).

**Key-words:** Calorimeter, Thermal efficiency, Water flow.

## Lista de Figuras

Figura 2.1- Soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (ESAB, 2018). .....	13
Figura 2.2 - Processo de Soldagem TIG (Esab, 2018). .....	14
Figura 2.3 - Processo de Soldagem MIG/MAG (Esab, 2018).....	15
Figura 2.4 – Processo de soldagem a arco submerso (Esab, 2018). .....	16
Figura 2.5 - Esquema do calorímetro de efeito Seebeck usado por Giedt et al., 1989... 22	
Figura 2.6 – Calorímetro de efeito Seebeck (Adaptado de Giedt et al., 1989).....	22
Figura 2.7 – Calorímetro de caixa isolada (Adaptado de Cantin e Francis, 2005).....	23
Figura 2.8 – Calorímetro de nitrogênio líquido apresentado por Kenney et al., 1998. ...	24
Figura 2.9 – Esquema do calorímetro de água (Essers e Walter, 1981).....	24
Figura 2.10 – Esquema apresentando o calorímetro de fluxo contínuo de água com uma placa sendo soldada (Adaptado de Lu e Kou, 1989). .....	25
Figura 2.11– Calorímetro de fluxo contínuo de água apresentado por Haelsing et al. (2012). .....	26
Figura 2.12 – Calorímetro de fluxo contínuo de água (Arevalo, 2011). .....	27
Figura 3.1 – Calorímetro mostrando a resistência e os porta eletrodos.....	28
Figura 3.2 – Fonte IMC Inversal 450 (imc-soldagem.com.br).....	29
Figura 3.3 – Programa para aquisição de corrente e tensão através do software labVIEW.....	31
Figura 3.4 – Programa para aquisição de temperatura através do software labVIEW... 31	
Figura 3.5 – Calorímetro com a manta térmica. ....	32
Figura 3.6 – Caixa em acrílico para armazenamento da água utilizada no calorímetro. 33	
Figura 3.7 – Desenho representando o calorímetro usado nos experimentos. ....	33
Figura 3.8 – Gráfico de Tensão e Corrente. ....	35
Figura 3.9 – Gráfico da temperatura pelo tempo.....	36
Figura 4.1 – Gráfico da Eficiência térmica pela vazão.....	39

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Eficiência térmica dos processos de soldagem (conforme a Norma EN 1011-1). .....	17
Tabela 2.2 – Eficiências térmicas $k$ de diferentes processos de soldagem. ....	18
Tabela 3.1 – Características técnicas da Fonte Inversal 450 IMC.....	30
Tabela 4.1 – Tabela representando os valores de eficiência para cada vazão. ....	37
Tabela 4.2 – Valores médios de eficiência térmica para cada vazão. ....	37

## Lista de Abreviaturas

ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CI	Calor Imposto
EN	<i>European Standards</i>
MIG/MAG	<i>Metal Inert Gas/Metal Active Gas</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>

## Lista de Símbolos

$W$	Fluxo mássico de alimentação de água, Kg/s
$C_p$	Calor específico da água, KJ/Kg°C
$T_s$	Temperatura de saída da água, °C
$T_e$	Temperatura de entrada da água, °C
$t$	Tempo do processo de aquecimento, s
$Q_a$	Calor medido pelo calorímetro, J
$P_{inst}$	Potência média dos valores instantâneos, J/s
$v$	Velocidade de soldagem, mm/s
$V$	Vazão de água, m <sup>3</sup> /s
$\rho$	Massa específica da água, Kg/m <sup>3</sup>
$k$	Eficiência Térmica, %

## Sumário

1 – Introdução .....	11
2 - Revisão Bibliográfica.....	13
2.1 - Processos de soldagem.....	13
2.1.1 – Soldagem a arco elétrico com eletrodos revestidos.....	13
2.1.2 – Soldagem a Arco com Gás de Proteção e Eletrodo não Consumível.....	14
2.1.3 – Soldagem a Arco com Gás de Proteção e Eletrodo Consumível.....	15
2.1.4 – Soldagem a Arco Submerso .....	16
2.2 - Cálculo da Eficiência Térmica.....	17
2.3 - Mecanismos de Transferência de Calor.....	20
2.4 – Calorimetria.....	21
2.4.1 – Calorímetro de Efeito Seebeck.....	21
2.4.2 – Calorímetro de Caixa Isolada .....	23
2.4.3 – Calorímetro de Nitrogênio Líquido.....	23
2.4.4 – Calorímetro de Água .....	24
3 – Metodologia .....	27
3.1 - Fonte de Soldagem.....	29
3.2 - Sistema de Aquisição.....	30
3.3 – Calorímetro .....	32
3.4 - Cálculo das Vazões Utilizadas.....	34
3.5 - Cálculo da Energia do Processo.....	34
3.6 - Cálculo da Energia Absorvida .....	36
4 - Procedimento experimental .....	37
5 – Conclusão.....	40
6 - Referências bibliográficas.....	41

## 1. INTRODUÇÃO

Os processos de soldagem estão presentes em praticamente toda indústria. Desde que foram inventados estão sempre sofrendo modificações e melhorias. Diversos setores dependem desses processos em suas linhas, automotivo, naval, mineração, aeronáutica, entre muitos outros, para chegar a seu produto final.

Devido a sua ampla utilização na indústria é sempre necessário estar buscando formas de aperfeiçoar os processos, principalmente diminuindo o consumo de material e energia. Com isso, é de extrema importância entender como a energia é consumida na soldagem, ou seja, aproveitada para chegar a uma união de materiais, o que é avaliado pelo valor do índice chamado eficiência térmica (razão entre o calor absorvido pelo material de base, Calor Imposto, e o calor gerado pelo arco). A eficiência térmica ( $k$ ) é de suma importância na soldagem por fornecer a quantidade de energia que é realmente aproveitada por cada processo.

O Calor Imposto (CI), também chamado de Aporte Térmico, é uma das características importantes nos processos de soldagem, pois influi diretamente nas propriedades mecânicas e nas transformações metalúrgicas da junta soldada, principalmente nas propriedades ligadas a geometria e microestrutura. Porém, existe grande dificuldade no que diz respeito à avaliação do aporte térmico, pois o calor gerado pelo arco é de fácil quantificação, já o calor absorvido pelo material de base é de difícil avaliação.

Existem, na atualidade, diversas maneiras de se quantificar o calor absorvido, métodos teóricos (analíticos e numéricos) e métodos experimentais. Os métodos teóricos utilizam modelos matemáticos para calcular o quanto de calor é gerado, perdido e absorvido. Já os métodos experimentais utilizam equipamentos que são capazes de medirem a energia de soldagem gerada e o calor absorvido, e são baseados, principalmente, em calorimetria. Existem vários modelos de calorimetria, sendo os mais utilizados nos dias de hoje o de nitrogênio líquido e o de fluxo contínuo de água. O último método é conhecido há anos (início da década de 80, ESSERS E WALTER, 1981), mas ainda é o mais usado.

O calorímetro de fluxo de água é caracterizado por muitos parâmetros: tamanho, formato, material construtivo, ser de fluxo fechado ou aberto, vazão de fluxo de água, características dos termopares, nível de isolamento térmico e outros. O foco do presente trabalho será a avaliação da precisão deste método de quantificação do calor absorvido pelo material de base em função da vazão de fluxo de água. Esta característica do calorímetro será analisada sem utilizar nenhum processo de soldagem. Para que a avaliação seja a mais precisa possível será usada uma resistência elétrica imersa no fluxo de água do calorímetro e ligada a uma fonte de energia de soldagem com a característica estática do tipo Corrente Constante. Assim será possível quantificar o calor gerado pela resistência elétrica com uma alta precisão. Como o calor gerado (pela resistência elétrica) é capturado pelo fluxo de água em contato, as perdas são as menores possíveis, não ocorrendo àquelas inerentes à calorimetria com um processo de soldagem. O funcionamento deste método de calorimetria (capacidade de capturar o calor absorvido) e a sua precisão serão avaliados variando a vazão de água.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Processos de soldagem

Os processos de soldagem a arco caracterizam-se por realizar a união de metais por fusão, assegurando, na junta soldada as propriedades físicas, químicas e metalúrgicas. Nesses processos a área a ser soldada é aquecida por uma fonte concentrada de calor, levando a fusão localizada do metal.

#### 2.1.1 Soldagem a arco elétrico com eletrodos revestidos

A soldagem com eletrodo revestido é sem dúvida o processo de soldagem mais empregado. O calor fornecido pelo arco elétrico funde um eletrodo metálico revestido realizando a soldagem sobre a peça de trabalho (Figura 2.1). Quando ocorre a deposição de material do eletrodo através do arco para a poça de fusão, ocorre a proteção da mesma através dos gases produzidos durante a decomposição do revestimento. A escória resultante da fusão do revestimento protege o metal de solda da atmosfera durante a solidificação. O revestimento também proporciona estabilidade ao arco e controla a forma do cordão de solda.

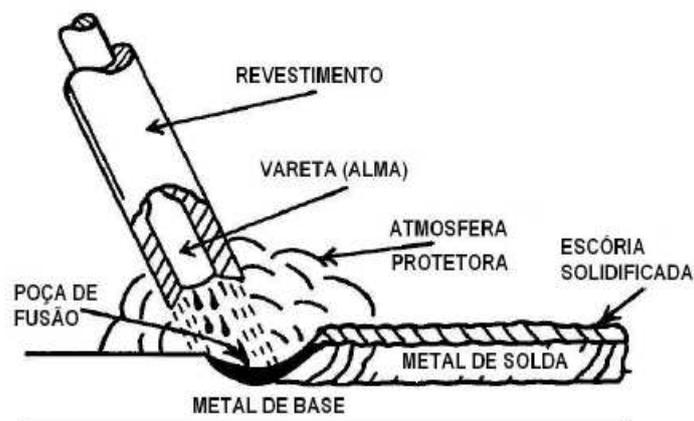


Figura 2.1 - Soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (ESAB, 2018).

### 2.1.2 Soldagem a Arco com Gás de Proteção e Eletrodo não Consumível

O processo de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*) é o processo que utiliza um eletrodo não consumível de tungstênio puro, no qual o arco elétrico se estabelece entre a peça de trabalho e o eletrodo. A poça de fusão e o eletrodo são protegidos contra efeitos atmosféricos por um gás inerte, principalmente pelo fato do eletrodo ser altamente reativo, cujo fluxo é direcionado pelo bocal da tocha de soldagem (SGARBI, 2013). Nesse processo pode ocorrer adição de metal ou não.

Este processo possui a capacidade de realizar soldas de alta qualidade em ligas de alumínio, aço inoxidável e magnésio. As soldas resultantes são, geralmente, livres de defeitos, com ótimas propriedades mecânicas e com bom acabamento. No início do processo era utilizado apenas o hélio como gás de proteção, na atualidade passou-se a utilizar também o argônio, este gás é economicamente mais viável o que resultou em um maior emprego do processo TIG pela indústria. A Figura 2.2 apresenta o processo de soldagem TIG.

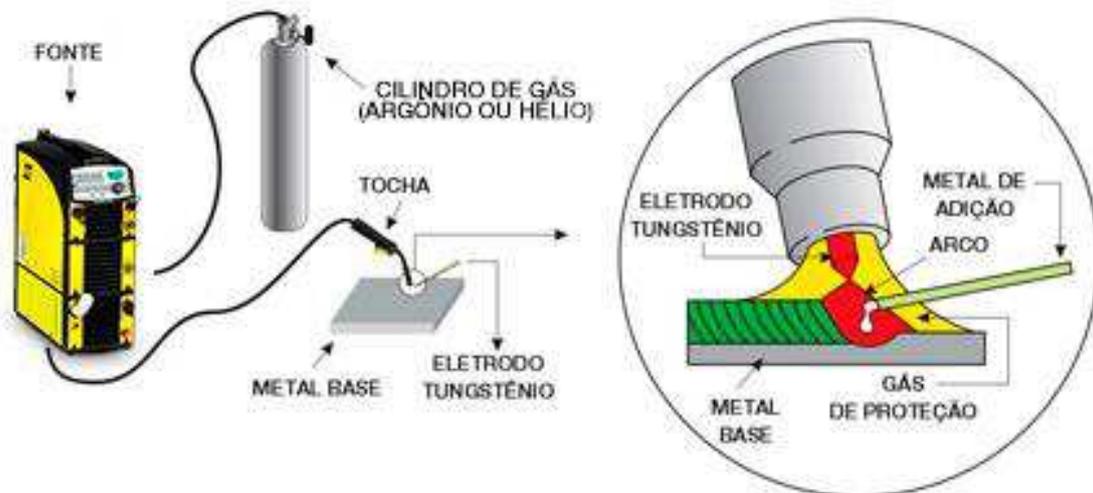


Figura 2.2 - Processo de Soldagem TIG (Esab, 2018).

### 2.1.3 Soldagem a Arco com Gás de Proteção e Eletrodo Consumível

O processo MIG/MAG (MIG – *Metal Inert Gas* e MAG – *Metal Active Gas*) é constituído de um arame eletrodo consumível alimentado continuamente e o gás de proteção. Seu princípio básico é a formação de um arco elétrico entre a extremidade do arame e o metal a ser soldado. A poça de fusão formada é protegida durante todo o processo pelos gases de proteção (Figura 2.3). O arame eletrodo é embobinado e alimentado continuamente por roletes acionados por um motor, o arame tem a função metalúrgica de proporcionar adição de elementos de liga e desoxidantes.

Soldagem MIG utiliza gases inertes, como Argônio (Ar) e Hélio (He), gases que não interagem com a poça de fusão. Na soldagem MAG a proteção gasosa é feita com gases ativos, que, além de assegurar a proteção, interagem com a poça de fusão. Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) e oxigênio (O<sub>2</sub>) e misturas dos mesmos são muito utilizados no processo.

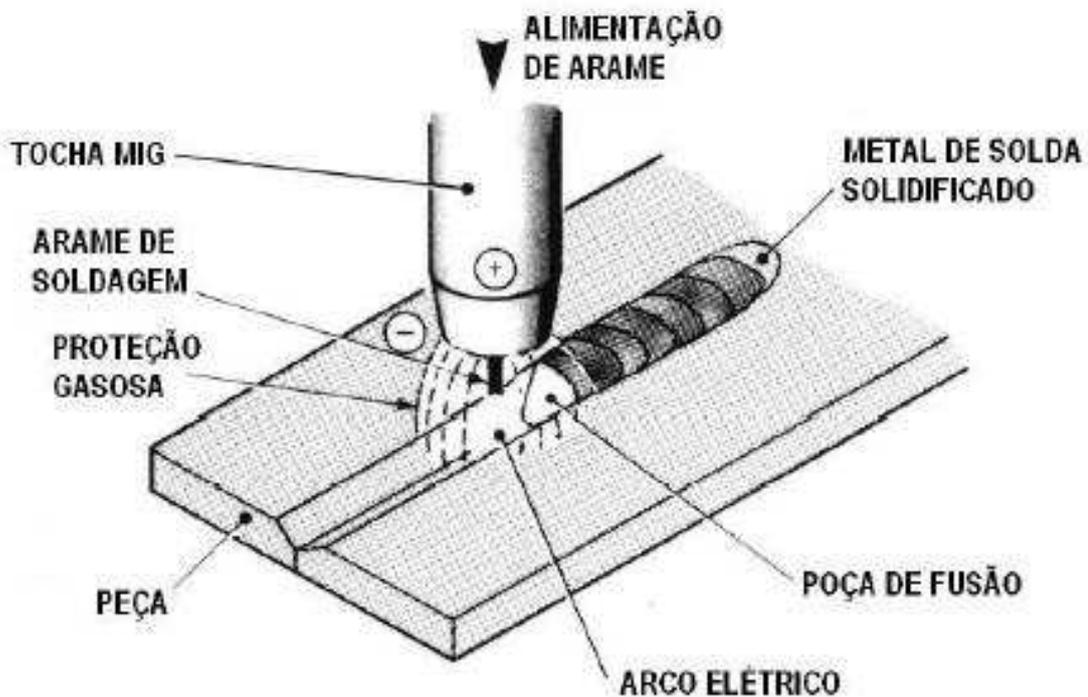


Figura 2.3 - Processo de Soldagem MIG/MAG (Esab, 2018).

### 2.1.4 Soldagem a Arco Submerso

O processo de soldagem a arco submerso é muito parecido com o processo MIG/MAG. O arco elétrico é formado entre o metal de base e o arame, este é alimentado continuamente. Ao longo da soldagem, o conjunto ponta do arame de soldagem, arco elétrico e a peça de trabalho, são cobertos por uma camada de material granulado, o qual é denominado de fluxo. Neste caso, o arco não é visível e não ocorrem faíscas, respingos ou fumos.

Este processo pode trabalhar com correntes de até 2000 A, CA ou CC, com um único arame, em soldagens monopasse de até 16 mm de espessura e multipasse sem limite de espessuras. Devido à elevada corrente, as poças de fusão são maiores que nos demais processos, desta forma, é necessário que todas as soldas sejam realizadas na posição horizontal. A Figura 2.4 apresenta esquematicamente o processo a arco submerso.

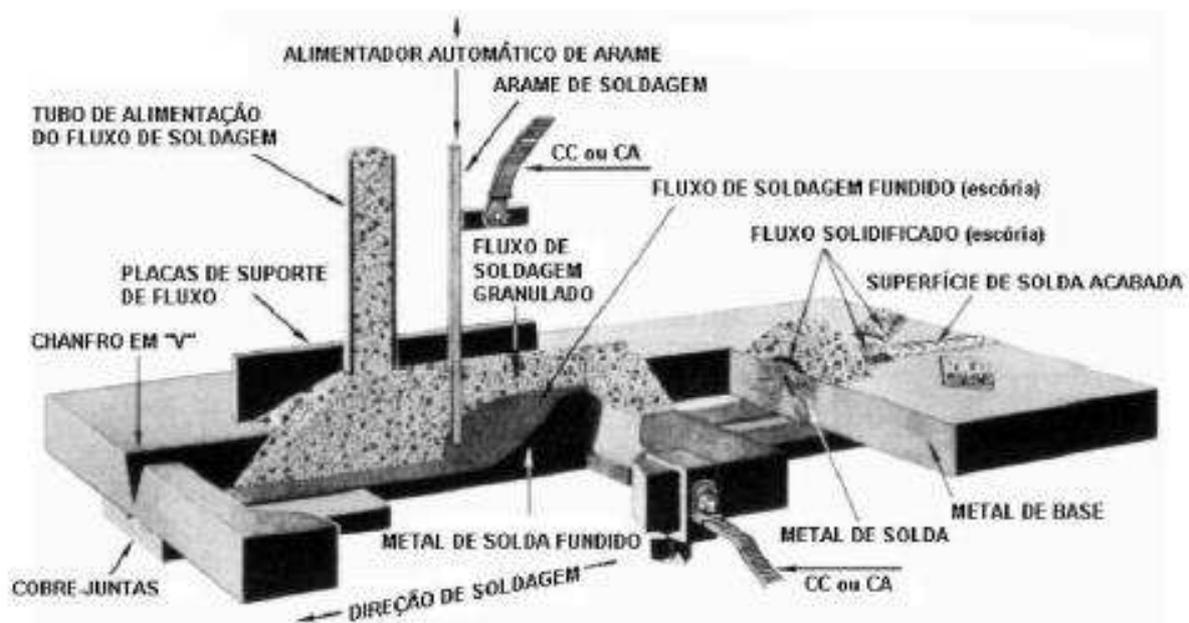


Figura 2.4 – Processo de soldagem a arco submerso (Esab, 2018).

## 2.2 Cálculo da Eficiência Térmica

Existem na atualidade duas normas com recomendações a respeito do cálculo do calor imposto (CI) em soldagem. A norma ASME IX-2013 não leva em consideração em sua equação o valor da eficiência térmica, logo a equação não deveria calcular o calor imposto e sim a energia da soldagem por unidade de comprimento de solda, conforme equação 2.1. A norma EN 1011-1:2009 – Recomendações para soldagem de materiais metálicos – Parte 1: orientação geral para soldagem a arco (2013), leva sim em consideração o valor da eficiência do processo (equação 2.2), porém considera que esse valor é constante para cada processo (Tabela 2.1). Na prática verifica-se que existe variação nos valores de eficiência nos processos de soldagem. Por isso é de extrema relevância calculá-los, para isso utilizamos os calorímetros e se faz necessário verificar também a capacidade dos mesmos de absorver o calor gerado para que os erros sejam minimizados.

$$CI = \frac{U_a \cdot I_s}{v} \quad (2.1)$$

$$CI = K \frac{U_a \cdot I_s}{v} \quad (2.2)$$

Onde: CI – Calor Imposto em J/mm,  $k$  – Eficiência térmica do processo,  $U_a$  – Tensão do arco,  $I_s$  – Corrente de soldagem,  $v$  – Velocidade de soldagem em mm/s.

Tabela 2.1 – Eficiência térmica  $k$  dos processos de soldagem (conforme a Norma EN 1011-1).

Process No	Process	Factor $k$
121	Submerged arc welding with wire electrode	1,0
111	Metal-arc welding with covered electrode	0,8
131	MIG welding	0,8
135	MAG welding	0,8
114	Flux-cored wire metal-arc welding without gas shield	0,8
136	Flux-cored wire metal-arc welding with active gas shield	0,8
137	Flux-cored wire metal-arc welding with inert gas shield	0,8
138	Metal-cored wire metal-arc welding with active gas shield	0,8
139	Metal-cored wire metal-arc welding with inert gas shield	0,8
141	TIG welding	0,6
15	Plasma arc welding	0,6

A Tabela 2.2 apresenta resultados de valores da eficiência térmica para os processos de soldagem a arco elétrico encontrados por diferentes autores de maneira experimental. Os resultados mostram que o valor desse índice apresenta elevada variação, diferente do resultado apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.2 – Eficiências térmicas  $k$  de diferentes processos de soldagem.

ER	TIG	MIG/MAG	SAW	Fonte
70 - 80%	20 - 50%	70 - 85%	90 - 99%	DUTTA et. al (1994), DuPONT e MARDER (1995)
90%	30 - 60%	70 - 80%	90%	NILES e JACKSON (1975), MISHRA e DEBROY (2005)
75%	60 - 80%	85%	90%	BAG e DE (2010)

No trabalho de Nascimento *et al.* (2007), verificou-se diferentes métodos para o cálculo da energia do arco. Utilizando o teorema da esperança, os autores demonstraram que os métodos mais apropriados são o do cálculo da potência instantânea média e da potência instantânea quadrática média, uma vez que estes podem ser utilizados nos casos em que a tensão e a corrente de soldagem são dependentes, (SGARBI, 2013).

A potência instantânea média pode ser obtida com a razão entre o somatório do produto da tensão e corrente em cada instante de tempo pelo número de amostras analisadas conforme equação 2.3.

$$P_{inst} = \sum_{i=1}^n (U_i \cdot I_i) / n \quad (2.3)$$

Onde  $U_i$  é dado em volts [V],  $I_i$  em amperes [A] e  $n$  é o número de amostras.

Para calcular o calor absorvido, utiliza-se a equação da calorimetria (equação 2.4), proposta por Dupont e Marder (1995). A integral resultante da variação da temperatura é equivalente à área do gráfico obtido pelo monitoramento das temperaturas da água.

$$Q_a = \int_0^t W \cdot c_p \cdot (T_s - T_e) \cdot dt \quad (2.4)$$

Onde:

W: vazão mássica da água em Kg/s;

$c_p$ : calor específico da água em J/Kg.K;

$T_s$  e  $T_e$ : temperaturas da saída e entrada respectivamente dadas em Kelvin;

t: tempo dado em segundos, s.

Na equação acima é necessário o cálculo das taxas mássicas, equação 2.5.

$$W = V \cdot \rho \quad (2.5)$$

Onde:

V: vazão em m<sup>3</sup>/s;

$\rho$ : massa específica da água dada em Kg/m<sup>3</sup>.

Do trabalho de Dupont e Marder (1995) temos que a eficiência do processo pode ser dada de acordo com a equação 2.6.

$$k = \frac{Q_a}{P_{inst} \cdot t} \quad (2.6)$$

Onde:

$Q_a$ : Calor medido pelo calorímetro, [J];

$P_{inst}$ : Potência média dos valores instantâneos, [J/s];

t: Tempo do processo de aquecimento, [s].

### 2.3 Mecanismos de Transferência de Calor

Nos processos de soldagem a arco elétrico o calor imposto é de suma importância, determinando as propriedades finais da junta soldada. Entender como ocorre estes fenômenos e suas influências possibilita maior controle dos processos.

O arco elétrico fornece grande quantidade de energia na forma de som, luz e calor, onde o que realmente interessa é o calor gerado. Este é utilizado para fundir o metal de base, porém, ao longo do processo, grande parte desse calor é perdido para o meio. Como a temperatura ambiente é menor que a temperatura do arco, ocorre transferência de calor para esse meio, pois o calor é definido como a energia térmica em trânsito devido à diferença de temperaturas no espaço, (INCROPERA *et al.*, 2008).

Existem três mecanismos principais para a transferência de calor, condução, convecção e radiação. Todas elas ocorrem nos processos de soldagem.

A condução se caracteriza pela transferência entre corpos em contato com diferentes temperaturas, não necessariamente corpos sólidos, porém nesses a condução é maior. Como a temperatura pode ser definida como o estado de agitação das partículas, a condução pode ser interpretada como a transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas.

A convecção ocorre quando um fluido em movimento está em contato com uma superfície e suas temperaturas são diferentes. Ela pode ser forçada, quando existe um meio externo contribuindo para o escoamento, ou livre quando o escoamento ocorre devido apenas às diferenças de temperatura. Os fenômenos associados são mais complexos, pois dependem das propriedades do fluido (massa específica, condutividade térmica, calor específico, viscosidade) e também da geometria da superfície.

Toda superfície que não possui temperatura nula emite ondas eletromagnéticas na forma de radiação térmica, essa forma de transferência não exige um meio para se propagar, sendo mais eficiente no vácuo. Grande parte da energia perdida para o meio nos processos de soldagem advém desse mecanismo de transferência de calor.

## 2.4 Calorimetria

Calorimetria é o estudo da troca de calor entre corpos e sistemas. Com as medidas realizadas por esses instrumentos é possível determinar a condutividade térmica ou capacidade calorífica de materiais. Calorímetros são os instrumentos de medição utilizados para essa finalidade. Segundo Dutta *et al.* (1994), os calorímetros podem ser agrupados de acordo com seu funcionamento:

- Resfriamento da placa de teste durante e após a soldagem por fluxo de água (o calor imposto é determinado com base na variação da temperatura na entrada e saída do líquido);
- Imersão da placa de teste em nitrogênio líquido exatamente após a soldagem (o calor imposto é determinado com base na massa evaporada do nitrogênio líquido);
- Realização da soldagem na placa de teste posicionada no fundo de um calorímetro fechado, neste caso o calor é determinado a partir das temperaturas monitoradas nas superfícies da placa de teste durante a soldagem e tempo de resfriamento.

### 2.4.1 Calorímetro de Efeito Seebeck

Giedt *et al.* (1989), utilizaram o calorímetro de efeito Seebeck para analisar os efeitos da variação dos parâmetros de soldagem no rendimento térmico do processo TIG. As medições foram realizadas com um circuito de termopares colocados nas superfícies interna e externa. Com essa disposição é formada uma termopilha, multiplicando a saída termelétrica do sistema (Figura 2.5).

DuPont e Marder (1995), também usaram o calorímetro de efeito Seebeck, semelhante ao usado por Giedt *et al.* (1989), (Figura 2.6). No modelo desenvolvido um lado da junção é constantemente resfriado por água, enquanto o outro lado fica em contato com o corpo de prova. Essa diferença de temperatura é medida por um par de termopares, cada um posicionado de um lado da junção.

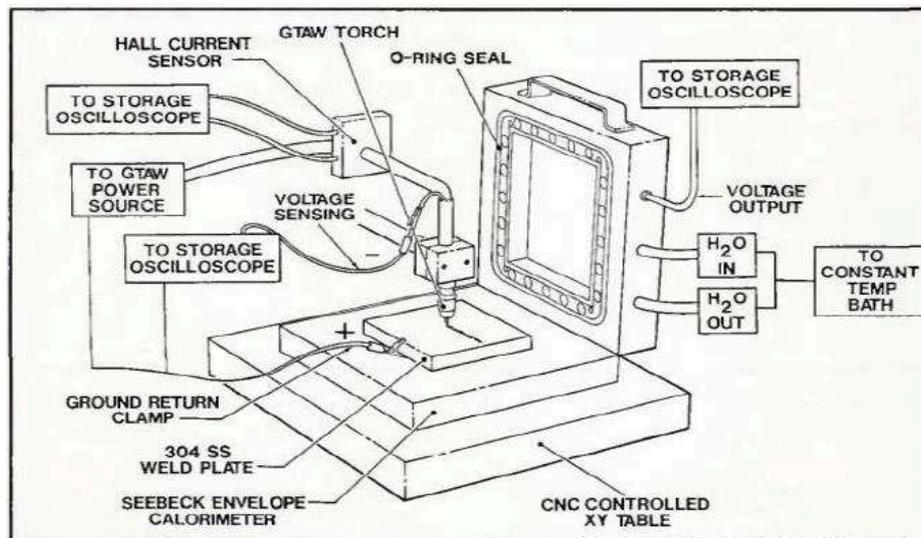


Figura 2.5 - Esquema do calorímetro de efeito Seebeck usado por Giedt et al., 1989.

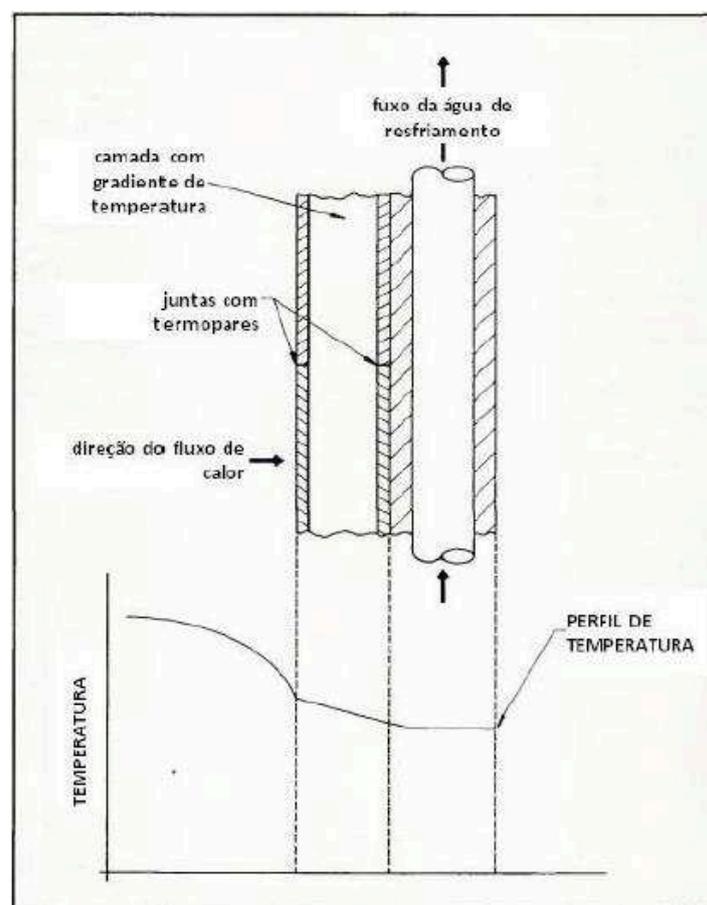


Figura 2.6 – Calorímetro de efeito Seebeck (Adaptado de Giedt et al., 1989).

### 2.4.2 Calorímetro de Caixa Isolada

Cantin e Francis (2005) utilizaram o Calorímetro de Caixa Isolada para quantificar o calor imposto no processo TIG soldando Alumínio (Figura 2.7). O equipamento consiste em uma base de cerâmica onde foi apoiado o bloco a ser soldado. Termopares foram posicionados na peça para monitoramento da temperatura antes e após a soldagem.

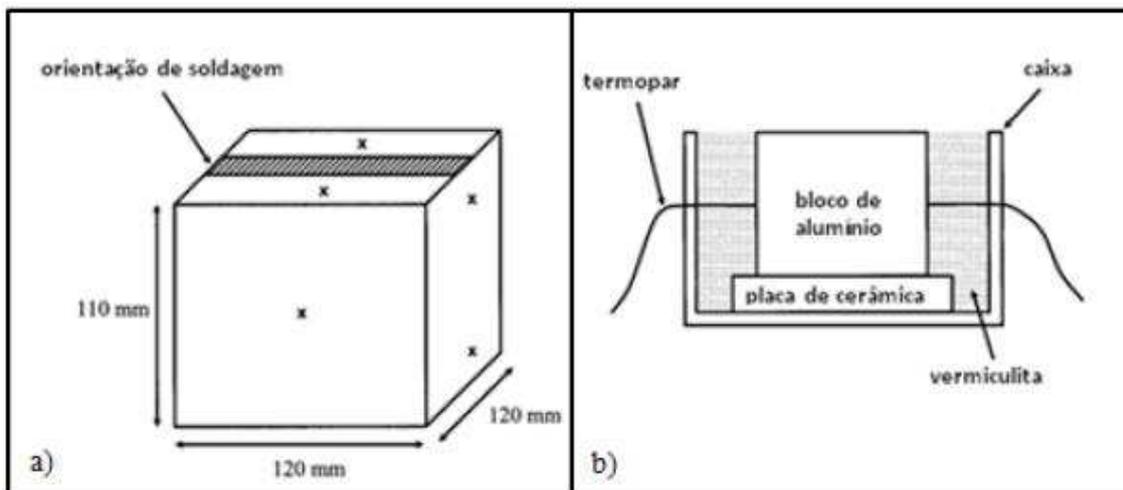


Figura 2.7 – Calorímetro de caixa isolada (Adaptado de Cantin e Francis, 2005).

### 2.4.3 Calorímetro de Nitrogênio Líquido

Um dos métodos mais utilizados recentemente é o calorímetro de nitrogênio líquido. Vários autores (KENNEY *et al.*, 1998; JOSEPH *et al.*, 2003; HARWIG, 2001; SCOTTI, 2008; PEPE *et al.*, 2010) utilizaram esse método para quantificar o calor imposto. O calor fornecido para a chapa durante a soldagem é transferido para o nitrogênio líquido em um recipiente isolado, após o contato o nitrogênio entra em ebulição. Quantifica-se a variação da massa de nitrogênio antes e após a imersão da chapa, essa diferença junto com o calor latente de vaporização do nitrogênio é possível determinar a quantidade de calor trocado, conseqüentemente, o calor fornecido para a chapa. Kenney *et al.* (1998), propôs um calorímetro composto por um recipiente criogênico posicionado sobre uma balança digital, (Figura 2.8).



Figura 2.8 – Calorímetro de nitrogênio líquido apresentado por Kenney et al., 1998.

#### 2.4.4 Calorímetro de Água

O calorímetro de água é um dos métodos experimentais mais utilizados para medição do calor transferido para a peça. O primeiro foi descrito por Essers e Walter (1981). No modelo proposto pelo autor uma placa está submersa em água com apenas uma superfície (superior) descoberta para formação do cordão de solda (Figura 2.9). A variação da temperatura é monitorada constantemente através de termopares e a movimentação da água garantida por um misturador.

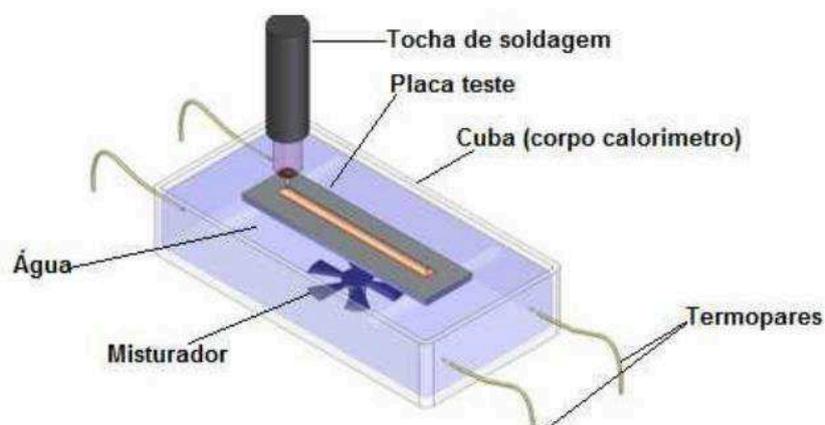


Figura 2.9 – Esquema do calorímetro de água (Essers e Walter, 1981).

Uma derivação desse calorímetro com bastante utilização se baseia no fluxo contínuo de água e tem sua principal aplicação na determinação da capacidade calorífica de fluidos (RAMASWANY, 1998). Nesse modelo, através do escoamento contínuo de água com vazão constante no interior do instrumento extrai-se o calor da peça que recebe o arco elétrico, aumentando a temperatura da água. A diferença de temperatura é medida por termopares durante o período de tempo que ocorre o aquecimento até a temperatura na saída retornar a temperatura ambiente. A Figura 2.10 apresenta o modelo utilizado no trabalho de Lu e Kou, (1989).

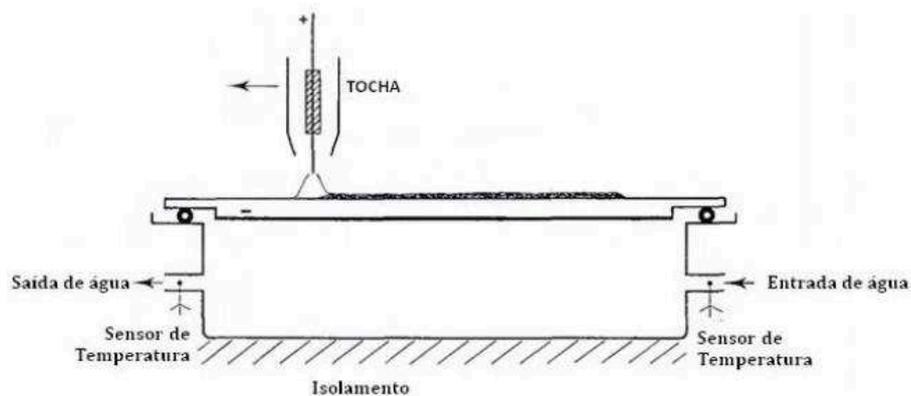


Figura 2.10 – Esquema apresentando o calorímetro de fluxo contínuo de água com uma placa sendo soldada (Adaptado de Lu e Kou, 1989).

Lu e Kou (1989) utilizaram esse calorímetro para determinar a quantidade de calor imposto no processo MIG/MAG. O calorímetro utilizado possui corpo em aço inox, placa de teste, selo de vedação, termopares e sistema de alimentação constante de água.

Haelsing *et al.* (2012) apresentaram uma versão mais inovadora do calorímetro de água. Para medir a “eficiência térmica efetiva” dos processos de soldagem e várias espessuras das placas, a mesma é posicionada com certo ângulo no recipiente calorimétrico termicamente isolado. Essa posição garante que deformações das placas não irão influenciar nas medições. A tocha é movimentada por sistema robótico. O nível da água é aumentado constantemente, eliminando a distância entre o local de imposição da energia de soldagem e o nível de água. Com essas características o calor transferido para a peça permanece no ambiente do calorímetro. Para garantir à distribuição homogênea de temperatura a água é circulada constantemente. A temperatura é

monitorada através de termopares posicionados no recipiente. A Figura 2.11 apresenta o sistema proposto pelos autores.

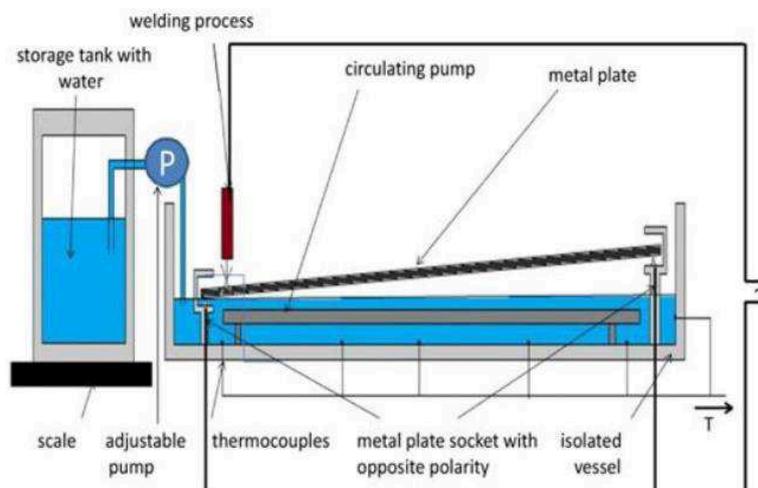


Figura 2.11 – Calorímetro de fluxo contínuo de água apresentado por Haelsig et al. (2012).

Arévalo (2011) utilizou uma nova configuração do calorímetro, semelhante ao proposto por Lu e Kou (1989). O modelo apresentado é composto por três partes principais: corpo do calorímetro, sistema de alimentação de água e o sistema de monitoramento dos sinais de saída dos termopares e medidor de fluxo de água.

O corpo do calorímetro é constituído pela base e selo de vedação. A base é constituída de aço inoxidável tendo em conta que a condutividade térmica é menor que a do aço carbono, além de não sofrer corrosão, visto que está sempre em contato com a água.

A alimentação de água é realizada de forma constante, evitando flutuações que podem acontecer devido a quedas de pressão e aumento no fluxo de água na linha de alimentação. Para que isso não ocorra foi desenvolvido um sistema que mantém o nível da água constante.

O sistema de monitoramento é constituído por dois termopares tipo T posicionados nas extremidades do corpo do calorímetro realizando as leituras de forma constante e placa de leitura de sinais. Foram escolhidos termopares tipo T devido a sua maior sensibilidade sendo seu valor de  $10 \mu V/^{\circ}C$ . A Figura 2.12 apresenta o modelo proposto pelo autor.

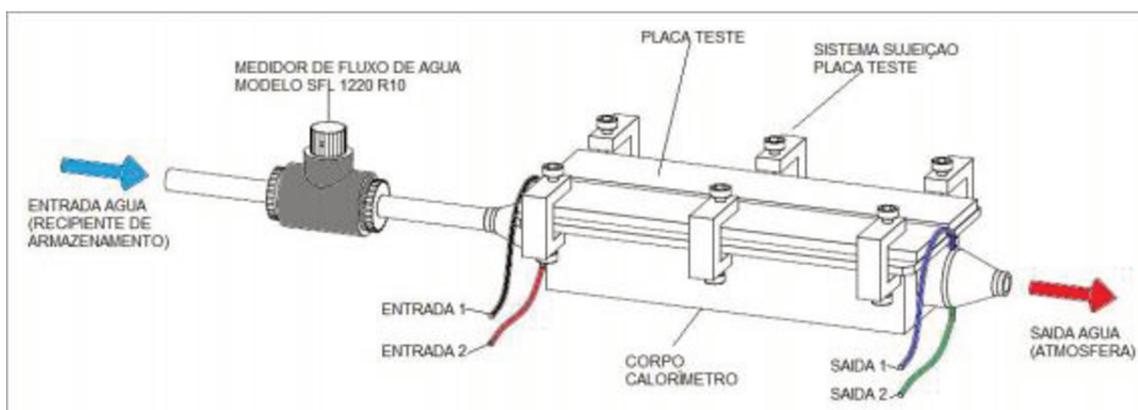


Figura 2.12 – Calorímetro de fluxo contínuo de água (Arévalo, 2011).

### 3. METODOLOGIA

O calorímetro de fluxo de água é caracterizado por muitos parâmetros: tamanho, formato, material construtivo, ser de fluxo fechado ou aberto, vazão de fluxo de água, características dos termopares, nível de isolamento térmico e outros. Cada parâmetro pode influenciar na capacidade do calorímetro de capturar o calor fornecido. Neste trabalho o parâmetro analisado foi a vazão de fluxo de água, variando seu valor e calculando posteriormente os valores de eficiência térmica.

Como o foco do presente trabalho é a avaliação da precisão deste método de quantificação do calor absorvido pelo material de base em função da vazão de fluxo de água, esta característica do calorímetro será analisada sem utilizar nenhum processo de soldagem. Para que a avaliação seja a mais precisa possível, será usada uma resistência elétrica imersa no fluxo de água do calorímetro e ligada a uma fonte de energia de soldagem com a característica estática do tipo Corrente Constante (Figura 3.1). Deste modo, será possível quantificar o calor gerado pela resistência elétrica com uma alta precisão.

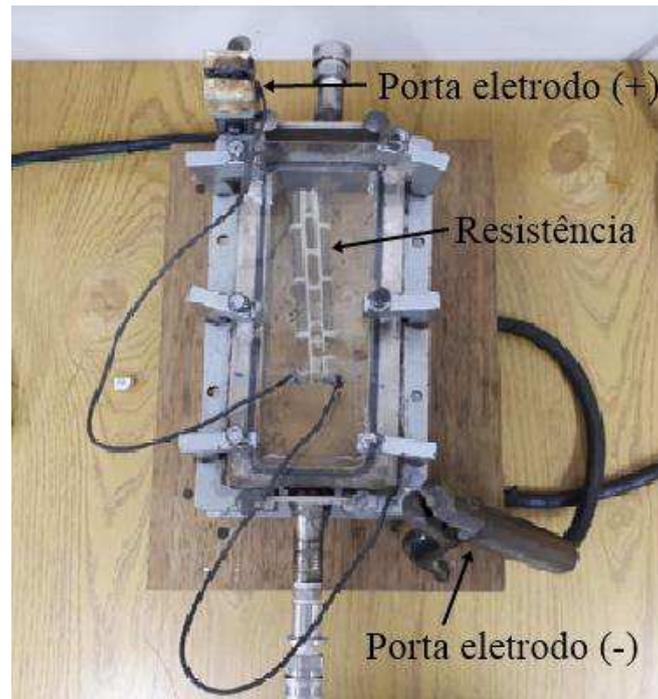


Figura 3.1 – Calorímetro mostrando a resistência e os porta eletrodos.

Nas extremidades da resistência foram acoplados dois fios fixados na superfície da placa de acrílico. A fonte foi conectada através de dois porta eletrodos nas extremidades dos fios.

Como foi mostrado na Revisão Bibliográfica, cada processo apresenta uma eficiência diferente dependendo das características, tipo de proteção, eletrodo consumível ou não. No caso do processo de soldagem TIG em que o eletrodo é não consumível, a eficiência é menor, 20-50 %, (DUPONT e MARDER, 1995), pois grande parte do calor fica retida na ponta do eletrodo. O processo de maior eficiência é o arame submerso variando de 90 – 99 %, (DUPONT e MARDER, 1995). Para que seja efetiva a análise dessas informações o calorímetro precisa fornecer uma capacidade de capturar o calor com eficiência superior a esses valores.

É esperado que no caso deste trabalho (calorímetro com uma resistência elétrica imersa no fluxo de água) o calor capturado vai ser muito próximo ao calor gerado pela resistência. Como o calor gerado (pela resistência elétrica) é capturado pelo fluxo de água em contato, as perdas são as menores possíveis, não ocorrendo àquelas inerentes à calorimetria com um processo de soldagem. Ou seja, a eficiência térmica é esperada a ser próxima a 100%.

As atividades foram desenvolvidas no laboratório de soldagem (LAPROSOLDA) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

Foram utilizados os seguintes equipamentos para realização do trabalho:

- Fonte de soldagem;
- Sistema de aquisição (tensão, corrente e temperatura);
- Calorímetro.

### 3.1 Fonte de Soldagem

Para realização dos testes foi utilizada uma fonte de soldagem multiprocessos modelo inversal 450 da fabricante IMC, com capacidade para 450 A (Figura 3.2). As características técnicas da fonte se encontram na Tabela 3.1 conforme o fabricante.

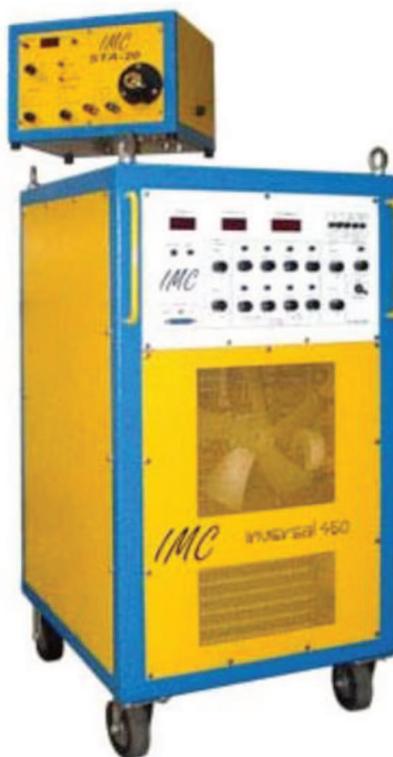


Figura 3.2 – Fonte IMC Inversal 450 ([imc-soldagem.com.br](http://imc-soldagem.com.br)).

Tabela 3.1 – Características técnicas da Fonte Inversal 450 IMC.

Tensão de alimentação	220, 380, 440 V Trifásica
Tensão em vazio	68 V
Corrente	Contínua ou alternada (Constante ou pulsada)
Fator de potência	0,95
Corrente nominal	280 A
Corrente máxima	450 A
Corrente a 100 % Fc	280 A /35 V
Potência nominal	13 KVA

### 3.2 Sistema de Aquisição

O sistema de aquisição de dados realiza a leitura dos valores de tensão, corrente e temperatura. Para isso foi utilizado sensores específicos para cada parâmetro.

A aquisição da tensão é feita mediante um receptor acoplado ao sistema de alimentação da resistência que capta o sinal elétrico de tensão e o envia para uma placa condicionadora, esta está acoplada ao sistema de aquisição de dados. Este sistema envia o sinal para o computador através de conexão USB para leitura via programa gerado no labVIEW.

A aquisição de corrente é feita através de um sensor de efeito Hall localizado no eletrodo de polo negativo da fonte. A leitura de dados ocorreu da mesma forma que a tensão utilizando as mesmas placas e a leitura no mesmo programa. A aquisição ocorreu com uma taxa de amostragem de 5000 amostras/segundo com período médio de 30 segundos para cada teste.

As temperaturas de entrada e saída foram monitoradas através de dois termopares do tipo T, um na entrada e outro na saída do calorímetro. A placa de aquisição possui interface direta com o computador para monitoramento através do labVIEW. As Figuras 3.3 e 3.4 apresentam a interface dos programas usados no labVIEW para monitorar os valores de corrente, tensão e temperatura respectivamente.

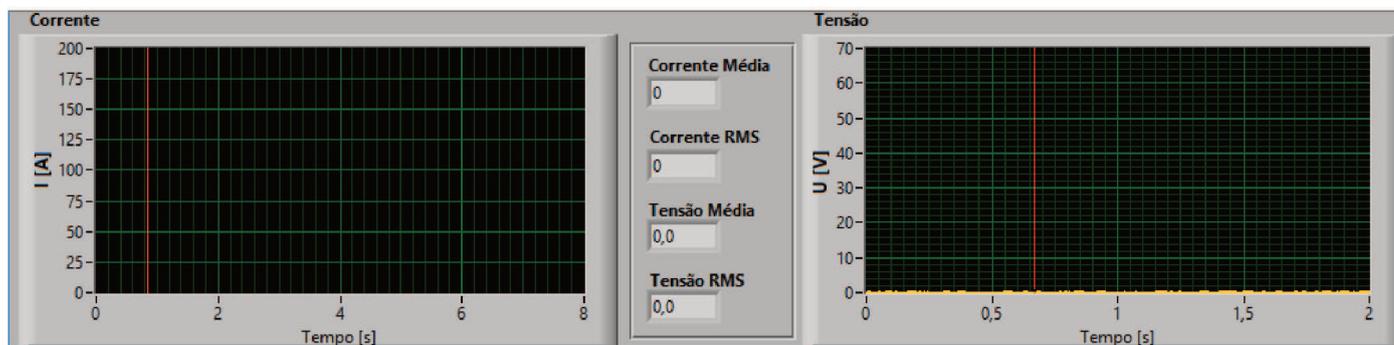


Figura 3.3 – Programa para aquisição de corrente e tensão através do software labVIEW.

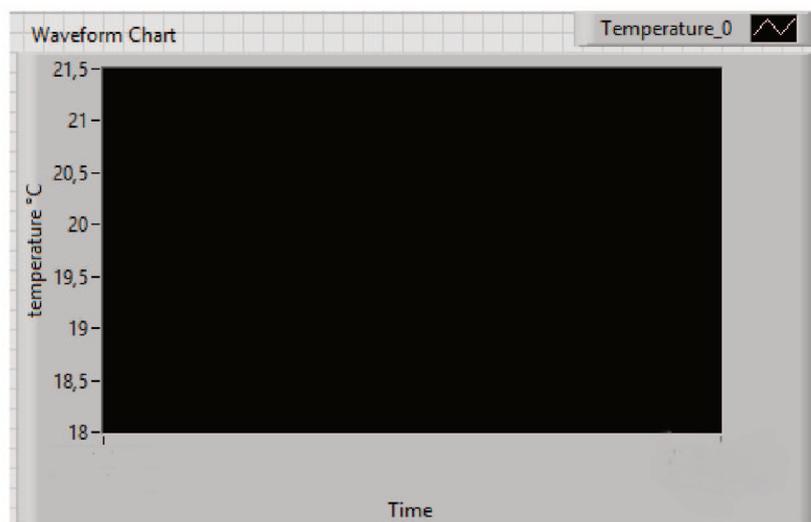


Figura 3.4 – Programa para aquisição de temperatura através do software labVIEW.

### 3.3 Calorímetro

Embora existam diversos modelos de calorímetro para realizar a análise da eficiência térmica, para o presente trabalho foi utilizado o calorímetro de fluxo contínuo de água. Este modelo apresenta características que possibilitam uma análise mais criteriosa do processo de transferência de calor do arco para a peça, como por exemplo, a medição de temperatura continuamente ao longo da soldagem, e seu baixo custo em relação a outros modelos de calorímetros.

O corpo do calorímetro é composto pela base, borracha de vedação e placa acrílica na parte superior. A base é constituída de aço inoxidável, material com condutividade térmica menor que o aço carbono garantindo menores perdas para o meio, além disso, não sofre corrosão visto que está em constante contato com água. A borracha de vedação garante que não ocorra vazamento entre o corpo do calorímetro e a placa de acrílico. A placa acrílica foi utilizada na parte superior do calorímetro como uma tampa permitindo que seja monitorado visualmente o processo. O corpo do calorímetro foi revestido com uma manta térmica garantindo ainda mais o nível de isolamento do sistema (Figura 3.5).



Figura 3.5 – Calorímetro com a manta térmica.

O sistema de alimentação de água consiste de um reservatório em acrílico de 25 x 25 x 60 cm, contendo a entrada principal de água, um ponto de saída na parte inferior responsável por alimentar o calorímetro e um ponto de saída na parte superior responsável por evacuar o excesso de água garantindo o mesmo nível, aproximadamente

30 litros (Figura 3.6). Na parte inferior do reservatório, que alimenta o calorímetro, foi instalada uma válvula de esfera manual de aço inox, podendo controlar a vazão da água apenas com abertura da mesma. Essa disposição possibilitou utilizar uma vazão constante para cada experimento e evitou variação na pressão e no fluxo de água da linha principal. As interligações foram feitas através de mangueiras transparentes, flexíveis e comerciais e a água utilizada proveniente da rede pública de distribuição. A Figura 3.7 representa o calorímetro utilizado nos experimentos.



Figura 3.6 – Caixa em acrílico para armazenamento da água utilizada no calorímetro.

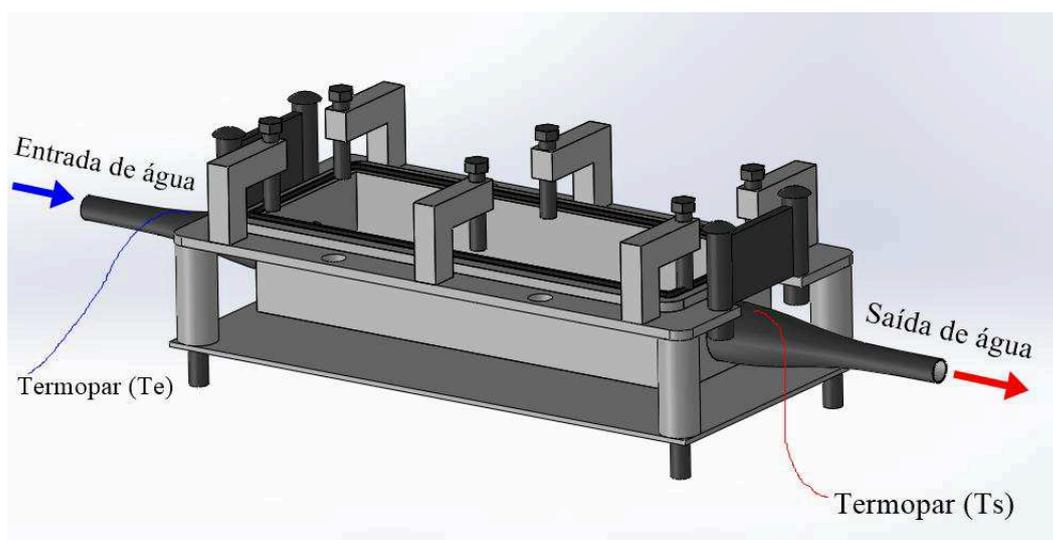


Figura 3.7 – Desenho representando o calorímetro usado nos experimentos.

### **3.4 Determinação das Vazões Utilizadas**

Para a determinação das vazões utilizou-se a válvula de esfera do reservatório com abertura total garantindo o máximo fluxo. Após deixar o calorímetro, a água segue por outra mangueira até ser descartada. Foram demarcadas em uma estrutura vertical, quatro diferentes alturas para que fosse acoplada a mangueira em cada uma delas para verificação da vazão. Como o nível do calorímetro e do reservatório não se alteram a diferença de altura da saída de água proporciona uma variação na vazão. Quanto mais alto o nível, menor será a vazão encontrada. Após realizar as demarcações das alturas, foram realizadas as medições das vazões utilizando um balde comum, proveta graduada com capacidade de um litro e cronômetro.

Fixando a mangueira na altura desejada e colocando o balde embaixo na queda de água contou-se um minuto no cronômetro. Em seguida, verificou-se o volume coletado pelo balde através da proveta graduada em litros. Com essa relação obteve-se as vazões em l/min.

### **3.5 Cálculo da Energia do Processo**

Para o cálculo da energia fornecida ao sistema utilizou-se primeiramente o cálculo da potência instantânea, conforme revisão apresentada no item 2.2. Esse é um dos métodos recomendados, visto que leva em consideração pequenas variações que venham a ocorrer na tensão e na corrente.

As equações para o cálculo da eficiência térmica do processo de soldagem a arco descritas na Revisão Bibliográfica podem também ser utilizadas para caso do calorímetro com a resistência elétrica imersa. A principal diferença é que, ao invés de termos o arco gerando o calor, temos a resistência elétrica imersa no fluxo de água com o mesmo intuito de gerar o calor. Como o calor gerado (pela resistência elétrica) está capturado pelo fluxo de água em contato, as perdas são as menores possíveis, não ocorrendo àquelas inerentes à calorimetria com um processo de soldagem.

Utilizou-se a equação 2.3 para o cálculo da potência através dos dados obtidos pelo sistema de aquisição. Conforme Figura 3.8 considerou-se para o cálculo da potência

elétrica a região logo após o fornecimento de energia, momento em que a corrente deixa de ser nula, e o anterior ao encerramento da energia, momento em que a corrente volta a ser nula. A energia do processo foi calculada através do produto da potência calculada anteriormente pelo tempo de cada experimento.

Existe uma grande diferença no cálculo da potência em uma resistência ôhmica com o processo de soldagem. Na primeira, a contribuição da tensão e da corrente na geração de calor é a mesma, para manter a mesma potência devem ser escolhidas tensão e corrente de maneira inversamente proporcional. Porém, na soldagem, a transferência de calor não terá a mesma eficiência que a resistência mergulhada na água. Isso ocorre porque a geração de calor no arco se dá em três regiões distintas, mas apenas uma delas está acoplada a peça. No cálculo da energia de soldagem leva-se em consideração a velocidade do processo, no caso da resistência deve-se considerar o tempo de aquecimento visto que a mesma não possui movimento ao fornecer energia.

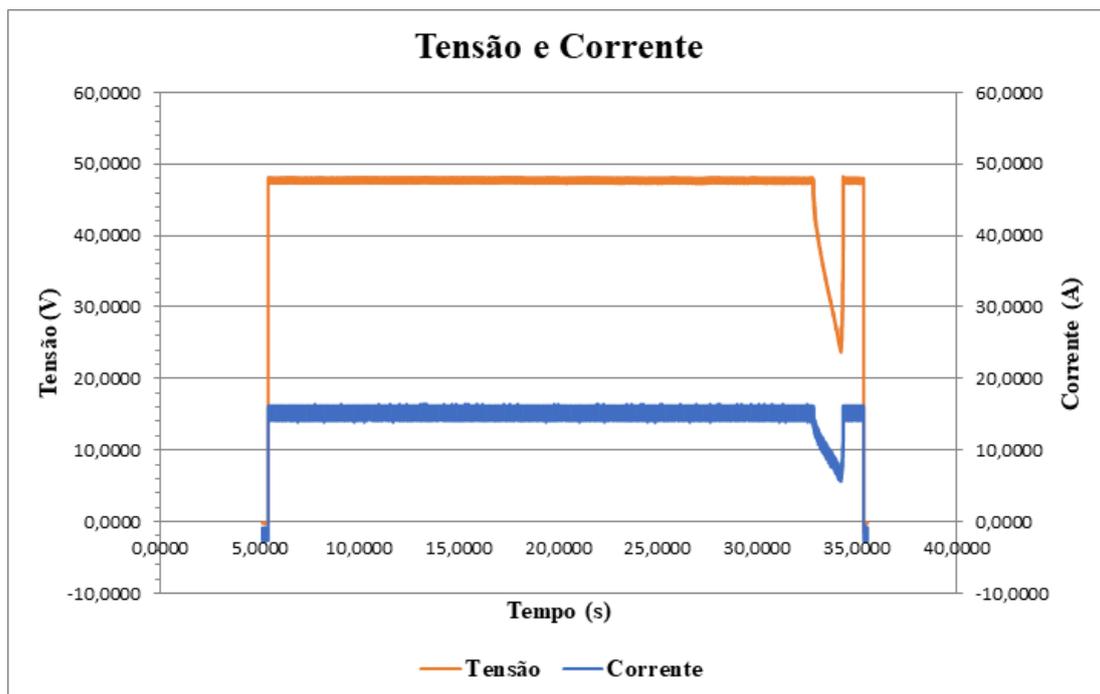


Figura 3.8 – Gráfico de Tensão e Corrente.

### 3.6 Cálculo da Energia Absorvida

Para o cálculo na energia absorvida será usada à equação 2.4. Os gráficos e os dados tratados foram obtidos através do software Microsoft Office Excel. Devido a interferências elétricas, erros da fonte, interferências do meio entre outros fatores fora de controle, alguns pontos das amostras não representavam os valores condizentes com o que se espera no experimento, portanto, os mesmos foram eliminados. Foram eliminados também os pontos antes de ocorrer o aquecimento da água e para a tensão e corrente foram eliminados os pontos antes e após o desligamento da fonte. A Figura 3.9 apresenta o comportamento das temperaturas na entrada e na saída do calorímetro.

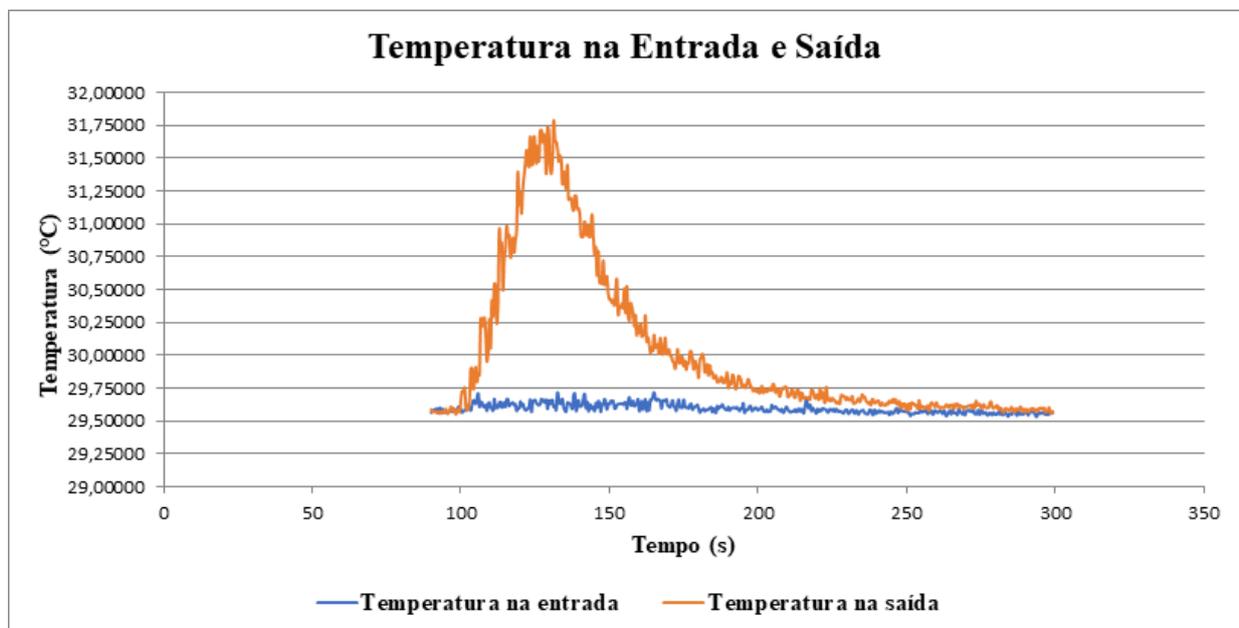


Figura 3.9 – Gráfico da temperatura pelo tempo.

#### 4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram avaliados cinco valores de vazões diferentes realizando três testes para cada uma, resultando num total de 15 testes. Foi utilizado o valor de tensão de 47 V e corrente de 15 A, com a fonte de energia de soldagem com a característica estática do tipo Corrente Constante, procurando manter o tempo de cada teste na faixa de 30 segundos. As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam os valores obtidos de eficiência térmica para cada vazão.

Tabela 4.1 – Tabela representando os valores de eficiência para cada vazão.

Teste	Vazão (l/min)	Tempo (S)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	E (J)	C. abs. (J)	k(%)
1	1,85	30,20	47,30	15,10	714,23	21388,43	19922,97	93,15
2	1,85	29,50	47,44	15,12	717,29	21300,62	19840,57	93,15
3	1,85	31,64	47,54	15,13	719,28	22899,06	21332,21	93,16
4	2,6	29,02	47,62	15,22	724,78	21176,45	19836,37	93,67
5	2,6	29,91	46,94	14,98	703,16	21160,11	19817,92	93,66
6	2,6	30,11	46,80	15,01	702,47	21266,49	19912,89	93,64
7	3,5	29,29	46,51	14,83	689,74	20328,30	19213,74	94,52
8	3,5	30,70	45,89	14,72	675,50	20857,61	19712,28	94,51
9	3,5	31,26	46,21	14,84	685,76	21498,72	20312,62	94,48
10	4,3	30,01	46,58	14,90	694,05	21084,21	20106,39	95,36
11	4,3	30,59	46,78	14,89	696,55	21443,72	20450,81	95,37
12	4,3	30,76	46,38	14,92	691,99	21407,81	20408,69	95,33
13	4,8	29,65	46,97	14,97	703,14	20984,14	20025,63	95,43
14	4,8	31,45	47,03	15,05	707,80	22397,64	21370,42	95,41
15	4,8	29,99	47,00	15,00	705,00	21273,28	20295,09	95,40

Tabela 4.2 – Valores médios de eficiência térmica para cada vazão.

Vazão (l/min)	Tempo (S)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	E (J)	C. abs. (J)	k(%)
1,85	30,45	47,43	15,11	716,68	21862,71	20365,25	93,15
2,6	29,68	47,12	15,07	710,10	21201,02	19855,73	93,66
3,5	30,42	46,20	14,80	683,76	20894,88	19746,21	94,50
4,3	30,45	46,58	14,90	694,04	21311,91	20321,96	95,36
4,8	30,36	47,00	15,00	705,00	21551,69	20563,71	95,42

A Tabela 4.2 apresenta os valores médios dos dados analisados. Procurou-se manter o tempo para cada teste na faixa de 30 segundos, obtendo alguma variação entre os mesmos. Isso não influencia no valor final da eficiência, pois se o tempo de aquisição é maior, proporcionalmente a energia fornecida também será e o calor absorvido também será maior.

Observou-se que à medida que se aumenta a vazão de água a eficiência térmica do sistema (calor capturado e mensurado) foi cada vez maior, ou seja, as perdas pelo calorímetro da energia gerada na resistência elétrica foram cada vez menores. A variação foi de 2,27 % na eficiência entre a menor vazão analisada, 1,85 l/min, e a maior vazão, 4,8 l/min. À medida que se aumenta o valor da vazão percebe-se uma redução na diferença entre as eficiências. Entre a vazão de 2,6 e 1,85 l/min a diferença é de 0,51, para a vazão de 4,8 e 4,3 l/min a diferença é de 0,06 resultando em uma saturação por volta de 95,42 %, obtido pela vazão de 4,8 l/min (maior vazão). Esse comportamento pode ser observado no gráfico da Figura 4.1.

Comparando os resultados, observa-se que a vazão ideal para os testes nos processos de soldagem com esse calorímetro é o valor de 4,3 l/min. Para utilizar o valor de 4,8 l/min deve-se aumentar 0,5 l/min em relação ao valor anterior para conseguir um aumento de apenas 0,06 na eficiência. Com isso fica inviável utilizar valores acima de 4,3 l/min, acima desse valor os ganhos de eficiência são muito pequenos se comparados aos valores dos intervalos anteriores. Os resultados analisados foram realizados com uma potência média de 705 W, é importante salientar que para análises desses resultados esse valor de potência foi mantido constante, e os valores de eficiência foram obtidos para esse valor específico, sendo necessário para testes futuros manter esse mesmo valor de potência.

Observa-se na Tabela 4.1, além da variação do tempo, variações nos valores de tensão e corrente média. No primeiro caso o erro é inerente ao operador que precisa estar atento para saber o momento correto de finalizar a coleta das amostras, porém as variações de tensão e corrente pode ser um problema tanto da fonte quanto do sistema de aquisição. Para que o experimento tenha o menor erro possível, é de suma importância que os valores dos parâmetros elétricos estejam os mais próximos possíveis, permitindo que a

energia e o calor absorvido variem apenas com o tempo. Esse fato não interfere no valor final calculado para a eficiência.

Considera-se que a pequena parcela de calor não registrada pelo calorímetro ocorre devido a características construtivas do mesmo, assumindo que a resistência elétrica consegue converter em 100 % a energia elétrica em calor. Assim essa perda de 4,64 % que ocorre na vazão de 4,3 l/min ocorrerá em todos os testes com os processos de soldagem analisados pelo calorímetro.

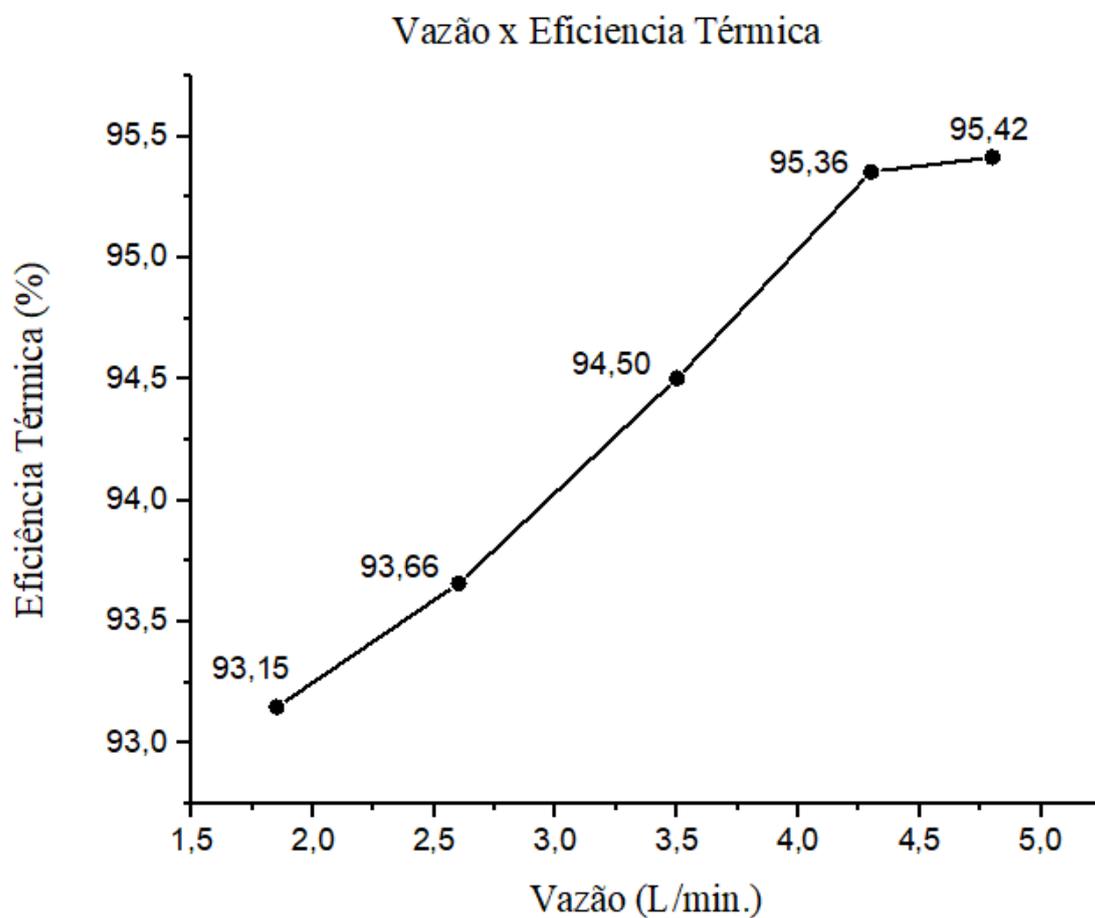


Figura 4.1 – Gráfico da Eficiência térmica pela vazão.

## 5. CONCLUSÃO

O presente trabalho analisou a influência da vazão na capacidade de um calorímetro de fluxo contínuo de água capturar o calor gerado por uma resistência elétrica. Foram realizados três testes para cada vazão a fim de garantir melhores resultados. Os valores obtidos de eficiência estão dentro da faixa esperada para o calorímetro.

Observou-se que aumentando-se a vazão de água o calor capturado e mensurado foi cada vez maior, ou seja, as perdas pelo calorímetro da energia gerada na resistência elétrica foram cada vez menores, chegando a uma saturação por volta de 95,42 %, obtido pela vazão de 4,8 l/min (maior vazão). Em outras palavras, embora o calorímetro recebesse 100 % de calor, ele deixou escapar 4,64 % de calor não mensurado (vazão de 4,3 l/min), devido às particularidades construtivas do mesmo. Esse valor não absorvido representa perdas de calor para o meio ambiente. Valores superiores não foram executados devido a limitações do laboratório como disposição dos equipamentos e instrumentos de leituras mais precisos.

O calorímetro de fluxo de água é caracterizado por muitos parâmetros: tamanho, formato, material construtivo, ser de fluxo fechado ou aberto, vazão de fluxo de água, características dos termopares, nível de isolamento térmico e outros. Cada parâmetro pode influenciar na capacidade do calorímetro de capturar o calor fornecido. É recomendado para trabalhos futuros variações desses parâmetros para analisar a influência na capacidade do calorímetro. Variações na profundidade do calorímetro podem influenciar na capacidade de captura da água permitindo maior eficiência. Também é recomendada para trabalhos futuros a utilização de equipamentos que permitam melhor coleta de dados e maior variação da vazão para que o campo de amostragem seja superior e consiga mostrar resultados não obtidos no presente trabalho. Os resultados de eficiência obtidos são relacionados a este calorímetro não sendo recomendado que se utilize esses valores para outros de fluxo contínuo. É necessária a realização dos testes e levantamento da curva de vazão pela eficiência para que fique claro qual o melhor valor de vazão a ser utilizado para cada calorímetro.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arévalo, H. D. H. **Desenvolvimento e Avaliação de Calorímetros via Nitrogênio Líquido e Fluxo Contínuo (Água) para Processos de Soldagem**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

BENZINGER, T.H.; KITZINGER, C. “**Direct Calorimetry by Means of the Gradient Principle.**” *The Review of Scientific Instrument* 12, n. 20 (1949): 849-860.

CANTIN, G M.D.; FRANCIS, E J A., “**Arc Power and Efficiency in Gas Tungsten Arc Welding of Aluminum.**” *Science and Technology of Welding and Joining*. Vol. 10, n. 2 (2005): 200-210.

DUPONT, J.N. & MARDER, A.R., **Thermal Efficiency of Arc Welding Processes.** *Welding Journal, Research Supplement*, Dec 1995, 406s – 416s.

DUTTA, P., JOSHI, Y. & FRANCHE, C., **Determination of gas tungsten arc welding efficiencies.** *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol 1, Issue 1, July 1994, pp. 80-89.

ESAB. **Apostila Arco Submerso** – Revisão 2004. Disponível em: <<http://www.esab.com.br>> Acesso em: 10/12/2018.

ESAB. **Apostila Soldagem MIG/MAG** – Revisão 2005. Disponível em: <<http://www.esab.com.br>> Acesso em: 10/12/2018.

ESAB. **Processo de Soldagem TIG**. Disponível em: <<http://www.esab.com.br>> Acesso em: 10/12/2018.

ESSERS, W. G.; WALTER, R. **Heat Transfer and Penetration Mechanisms with GMA and Plasma-GMA Welding**. Welding Journal, v. 60, p.37s-42s, 1981.

GIEDT, W. H.; TALLERICO, L. N.; FUERSCHBACH, W. **GTA Welding Efficiency: Calorimetric and Temperature Field Measurements**. Welding Journal, v. 68, p. 28s-32s, 1989.

GONCALVES, C.V., VILARINHO, L.O., SCOTTI, A. & GUIMARAES, G., **Estimation of heat source and thermal efficiency in GTAW process by using inverse techniques**. Journal of Materials Processing Technology 172 (2006), pp. 42 – 51.

HAELSIG, A.; KUSCH, M.; MAYER, P. **New Findings On The Efficiency Of Gas Shielded Arc Welding**. Welding in the World, v. 56, p. 98-104, 2012.

HARWIG, D.D., **Arc Behavior and Metal Transfer in the VP-GMAW Process**. Cranfield University: School on Industrial Manufacturing Science, 2003.

INCROPERA, F. P.; DE WITT, D. P.; BERGMAN, T. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. LTC, Rio de Janeiro, 2008.

JOSEPH, A.; HARWIG, D.; FARSON, D.F.; RICHARSON, R., “**Measurement and Calculation of arc Power and Heat Transfer Efficiency in Pulsed Gas Metal Arc Welding.**” Science and Technology of Welding and Joining, vol. 8, n. 6 (2003): 400-406.

KENNEY, K. L.; MILLER, K. S.; SMARTT, H. B. **Heat Transfer in Pulsed Gas Metal Arc Welding.** Proceedings to 5th International Conference for Trends in Welding Research, p. 357-361, 1998.

KOU, S.; LE, S. **Heat Flow During Autogenous GTA Welding of Pipes,** Metallurgical Transactions A. v. 15, p. 1165-1171, 1984.

LISKEVYCH O. **Calor Imposto Líquido: Um Novo Conceito Para Quantificação do Aporte Térmico em Soldagem a Arco** [Tese de doutorado]. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia; 2014.

LU, M. J.; KOU, S. **Power Inputs in Gas Metal Arc Welding of Aluminum - Part 2,** Welding Journal, v. 68, p. 452s-456s, 1989.

NASCIMENTO, S. A.; BATISTA, A. M.; NASCIMENTO, C. V.; SCOTTI, A. **Avaliação dos Métodos de Cálculo de Potência Elétrica em Soldagem a Arco e as Conseqüências sobre as Previsões Geométricas, Térmicas e Metalúrgicas da Junta,** Soldagem e Inspeção, v. 12, p. 97-106, 2007.

PEPE, N. V. C. **Advances in Gas Metal Arc Welding and Application to Corrosion Resistant Alloy Pipes,** Tese (PhD) – School of Applied Sciences – Cranfield University, Cranfield, 2010.

PEPE, N.; EGERLAND, S.; COLEGROVE, P.A.; YAPP, D.; LEONHARTSBERGER, A.; SCOTTI, A., “**Measuring the Process Efficiency of Controlled Gas Metal Arc Welding Processes**”, *Sci. and Technol. of Weld. Join.*, 16(5), 2011, p.412-417.

ROSENTHAL, D. 1941. **Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting.** *Welding Journal* 20(5):220-s to 234-s.

SCOTTI, A.; REIS R.P.; LISKEVYCH O., “**Modelo Descritivo do Fluxo de Calor em Soldagem a Arco Visando o Conceito de Calor Imposto Efetivo**”, *Soldag. e Insp.* São Paulo, Vol.17, Nº. 2, p.166-172, Abr/Jun 2012.

RAMASWANY, M. R.; ZAREIFARD, H. S., “**A Calorimetric Approach for Evaluation of Fluid-to-Particle Heat Transfer Coefficient Under Tube-Flow Condition.**”(Department of Food Science and Agricultural Chemistry, Macdonald Campus of McGill University, Ste. Anne de) 23, n. 495-502(1998).

SGARBI P. **Construção e validação de um calorímetro com vazão contínua de água para avaliação do rendimento térmico em processos de soldagem** [Dissertação de mestrado]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2013.