

**JEZREEL OLIVEIRA DA SILVA**

**INFLUÊNCIA DO CALORÍMETRO DE ÁGUA NA FORMAÇÃO DO  
CAMPO TÉRMICO GERADO NO METAL DE BASE DURANTE A  
SOLDAGEM TIG**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**2018**

**JEZREEL OLIVEIRA DA SILVA**

**INFLUÊNCIA DO CALORÍMETRO DE ÁGUA NA FORMAÇÃO DO  
CAMPO TÉRMICO GERADO NO METAL DE BASE DURANTE A  
SOLDAGEM TIG**

**Trabalho de conclusão de curso**, apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências para a obtenção do título de **engenheiro mecânico**.

Orientador: Professor Dr. Volodymyr Ponomarov

**2018**

A Deus, criador de todas as coisas.

Aos meus pais, João e Fátima, pelo amor e carinho.

A minha esposa, Thais Luanna, pelo apoio incondicional.

Aos meus irmãos, Aline e Matheus, pelos anos de paciência.

Aos meus sobrinhos e amigos, que coloreem a minha vida.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todo bem ao qual me concedeu.

Aos meus pais João e Fátima, pelas dificuldades vencidas para me darem a oportunidade de estudar.

Aos meus irmãos Aline e Matheus, pelos dias de ombro amigo e incentivos nesta longa jornada.

À minha amada esposa Thais Luanna, por ter me mostrado o caminho da felicidade.

Aos meus sogros Nilberto e Edilene, que me acolheram como filho em toda a graduação.

Aos meus cunhados William e Samuel, pelos abraços sinceros.

À minha avó Condelira, pelas orações feitas.

Aos meus amigos Anderson, Richard e Leonardo, pelos dias de risos.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este Curso.

Ao meu orientador, Professor Dr. Volodymyr Ponomarov, pela oportunidade de trabalhar junto e paciência.

Ao amigo Diego, por todo o suporte e ajuda nesse trabalho.

À minha querida tia Elza, minha segunda mãe, que faleceu durante a minha graduação.

*“Parece existir uma característica humana perversa que gosta  
de transformar coisas fáceis em coisas difíceis.”  
(Warren Buffett)*

## RESUMO

Este trabalho apresenta resultados de ensaios para estudar a influência do calorímetro de água na formação do campo térmico gerado no metal base durante a soldagem TIG. Para atingir o objetivo, inicialmente, foi proposta uma metodologia utilizando pirômetro para a medição de temperaturas em duas situações: com e sem a influência do fluxo de água. Porém, dificuldades encontradas invalidaram este método. Um novo método foi proposto, utilizando termopares espaçados igualmente no sentido perpendicular à direção de soldagem com o intuito de coletar temperaturas ao longo da soldagem e analisar as curvas geradas nos dois sistemas. Os resultados foram satisfatórios, apresentando diferenças esperadas, como o resfriamento mais lento sem o fluxo de água. Contudo, o método também apresentou resultados não esperados, como temperaturas de pico maiores para comprimentos de arco menores.

Palavras-chave: Soldagem TIG; Campo térmico; Aporte Térmico; Fluxo de Calor em soldagem.

## ABSTRACT

This paper shows test results for studying the influence of the water calorimeter in generation of the thermal field in a base metal during the TIG welding. To accomplish this goal, at first, the purposed methodology was to use a pirometer to measure the temperatures in two cases: with and without water's flow. Unexpected factors invalidated the results. A new methodology was then purposed using thermocouples equally distributed in a perpendicular line to the welding direction to measure the temperatures. There were satisfactory results, showing for example, the slow cooling without water's flow. However, there were unexpected results showing, among others, highest temperatures for lowers electric arc length.

Keyword: TIG Welding; Thermal Field; Heat Input; Heat flux in welding.

## LISTA DE SÍMBOLOS

°C – Graus Celsius

A – Ampère

AWS – American Welding Society

Cm/min – Centímetros por Minuto

DDP – Diferença de Potencial

DEP – Distância Eletrodo Peça

ESAB – Elektriska Svetsnings Aktie Bolaget

GMAW – Gas Metal Arc Welding

GTAW – Gas Tungsten Arc Welding

Hz – Hertz

L/min – Litros por Minuto

MB – Metal Base

Mm – Milímetro

NI – National Instruments

S – Segundos

T<sub>c</sub> – Temperatura Crítica

T<sub>f</sub> – Temperatura de Fusão

T<sub>p</sub> – Temperatura de Pico

V – Volt

ZAC – Zona Afetada pelo Calor

ZF – Zona Fundida



# SUMÁRIO

<b>Agradecimentos.....</b>	<b>4</b>
<b>1. Introdução.....</b>	<b>10</b>
<b>2. Revisão Bibliográfica .....</b>	<b>12</b>
2.2. Conceitos básicos de Soldagem.....	12
2.3. Características elétricas e térmicas do arco elétrico de soldagem .....	14
2.4. Processo TIG.....	17
2.5. Transferência de calor .....	18
2.6. Fluxo de calor .....	19
<b>3. Materiais .....</b>	<b>22</b>
<b>4. Métodos, resultados e discussões.....</b>	<b>24</b>
4.1. Ensaio com pirômetro.....	25
4.1.1. Resultados do ensaio com pirômetro .....	26
4.1.2. Discussão do ensaio com pirômetro.....	28
4.2. Ensaio com termopares.....	29
4.2.1. Resultados do ensaio com termopares .....	31
4.2.2. Discussão do ensaio com termopares.....	32
<b>5. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>35</b>
<b>6. Referências Bibliográficas .....</b>	<b>37</b>
<b>Anexo A – Coleção de dados para o ensaio com calorímetro e DEP 3 mm.....</b>	<b>38</b>
<b>Anexo B – Coleção de dados para o ensaio com calorímetro e DEP 5 mm.....</b>	<b>40</b>
<b>Anexo C – Coleção de dados para o ensaio sem calorímetro e DEP 3 mm.....</b>	<b>42</b>
<b>Anexo D – Coleção de dados para o ensaio sem calorímetro e DEP 5 mm.....</b>	<b>47</b>

# 1. INTRODUÇÃO

A evolução da ciência deriva da curiosidade humana, sempre em busca de solucionar seus questionamentos e em entender a lógica dos fenômenos. Através da tentativa e erro, os homens primitivos fizeram descobertas que são os pilares da sociedade atual, em que suas transformações permitiram criar tudo aquilo que está a nossa volta. Pela experimentação desenvolveu-se a teoria, necessária para propagar as descobertas e colaborar como suporte para novos avanços.

O caminho do desenvolvimento é o mesmo para todas as ciências, humanas, biológicas ou exatas. Dentro da área de exatas, existe uma subárea conhecida como engenharia mecânica. Uma de suas investigações está em compreender os fenômenos de transformações de aços e suas ligas para construir máquinas, estruturas metálicas, dispositivos de transporte de calor, entre outros, e este nicho é conhecido como metalurgia.

A metalurgia é responsável por uma parcela significativa na evolução da sociedade. Hoje é impossível imaginar o mundo sem a presença de instrumentos compostos por aços e ligas metálicas, os principais exemplos vão desde grandes prédios, portos e metrô, até pequenos componentes eletrônicos. Para tal desenvolvimento muito se estudou e pesquisou sobre os procedimentos para extrair, transformar e fabricar esses materiais, que servem de matéria-prima para o progresso humano. Entretanto, os materiais fabricados precisam ser moldados na geometria adequada para cada aplicação, e por essa necessidade derivou-se as áreas de conformação, usinagem e soldagem, por exemplo.

Conformação e usinagem, em termos gerais, são responsáveis por moldar os componentes sem a união de peças, enquanto a soldagem é a responsável por unir as peças e formar o sistema como um todo. Em suma, soldagem pode ser entendido como o processo de união de metais que procura garantir a continuidade das propriedades físicas e químicas da junta unida.

Existem variados processos de soldagem, cada um com suas vantagens e limitações. Um desses é a soldagem com eletrodo não consumível de tungstênio e proteção gasosa, TIG (Tungsten Inert Gas). Segundo Marques, Modenese e Bracarense (2011) a soldagem TIG é usada principalmente na união de metais difíceis de serem soldados por outros processos, em que a qualidade da junta é mais importante do que o custo, visto que este processo é lento e pouco produtivo, o que o torna relativamente caro se comparado com outros tipos de soldagem.

Neste contexto, a qualidade do cordão de solda é a principal variável no processo. Para produzir cordões de qualidade é necessário ter controle sobre o resfriamento da poça de metal líquido formada pela fusão, de maneira a garantir que não seja demasiadamente lento ou rápido, para que grandezas como dureza e tenacidade sejam próximas do restante do corpo.

Para tanto, este trabalho objetiva analisar os campos térmicos gerados durante o processo de soldagem em duas situações, com e sem a influência do calorímetro de água, com o intuito de avaliar a configuração dos campos térmicos gerados nos metais de base durante a soldagem TIG e investigar as diferenças entre as curvas de temperaturas.

Dentre os objetivos específicos a serem alcançados ao longo do desenvolvimento do projeto estão:

- Investigar a formação do campo térmico sem a presença do calorímetro;
- Investigar a formação do campo térmico com a presença do calorímetro;
- Comparar os campos térmicos;
- Investigar as diferenças encontradas;
- Avaliar a influência do calorímetro de água na configuração do campo térmico;
- Justificar interferências externas e erros de medição.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para um melhor entendimento deste trabalho é necessário que o leitor tenha conhecimento sobre os assuntos relacionados. Para tanto, desenvolveu-se uma breve revisão bibliográfica nas áreas que compreendem este estudo.

### 2.1. Conceitos básicos de Soldagem

Soldagem é um processo de união de metais, na sua essência. Porém, nos dias atuais o processo também pode ser utilizado para unir materiais não-metálicos, cortes, deposição de material sobre uma superfície para recuperação e revestimento de peças, se tornando o conceito mais abrangente.

A literatura desenvolveu várias tentativas de definições, entre elas a adotada pela Associação Americana de Soldagem (American Welding Society –AWS):

- “Processo de união de materiais usados para obter a coalescência (união) localizada de metais e não-metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição”.

Os processos de soldagem podem ser divididos em dois mecanismos principais: Por pressão (ou deformação), em que o fator principal é aquecer a uma temperatura abaixo da temperatura de fusão do material e aplicar pressão para a união, e por fusão, em que o fator principal é aquecer a uma temperatura acima da temperatura de fusão, de forma que a região seja unida na solidificação. No primeiro caso a união é resultado da aplicação de energia para introduzir tensões capazes de solubilizar os materiais ainda na fase sólida. Destacam-se soldagem por forjamento, ultrassom, fricção, difusão, explosão, entre outros. Na soldagem por fusão a região é fortemente aquecida, calor suficiente para fundir a área-alvo, e o principal processo é o de arco elétrico.

Os materiais a serem soldados recebem o nome de metal de base, e o resultado da união é chamado solda. A parte fundida é chamada poça de fusão, nela os materiais na fase líquida se misturam e tornam-se uma unidade após a solidificação. No processo de fusão um material pode ser adicionado, chamado de metal de adição, e é utilizado para introduzir componentes diferentes a solda ou adicionar mais material. A região física ou partes da peça sobre as quais a soldagem será realizada é chamada de junta, e nessa região pode-se fazer aberturas para depositar outros materiais, chamado de chanfro.

Após o processo, a região fundida é chamada de junta soldada ou apenas solda. A literatura distingue três regiões na junta soldada (Fig. 1). São elas:

- Zona fundida (ZF), região A: Região em que o material fundiu e depois solidificou, em que utiliza-se a expressão cordão de solda para nomeá-la. A ZF pode ser constituída de várias camadas ou passes, ou seja, vários passes de solda são realizados sobre a mesma área. Aqui as temperaturas de pico são superiores do que as temperaturas de fusão do material;
- Zona Afetada pelo Calor (ZAC), região B: Região em que o metal de base não muda de fase, mas tem suas propriedades e/ou estrutura alteradas devido ao aporte térmico. Aqui as temperaturas são superiores as críticas do material, porém são abaixo das temperaturas de fusão;
- Metal Base (MB), região C: Região mais afastada do cordão de solda, que não sofreu nenhuma alteração em suas propriedades e/ou estrutura porque as temperaturas são inferiores as críticas do material.

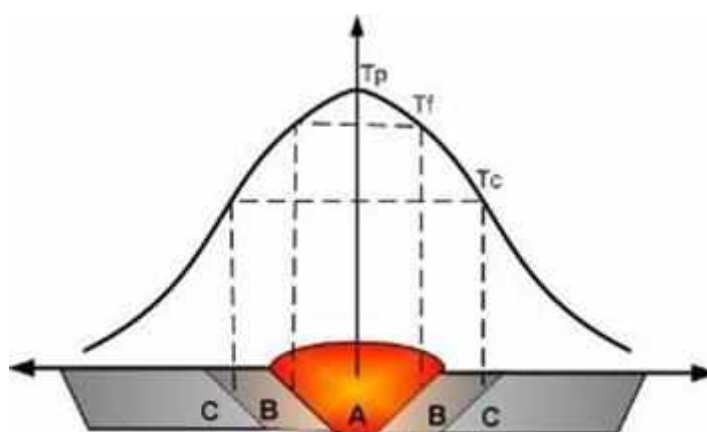


Figura 01. Representação esquemática das três regiões após a solda e temperaturas atingidas  $T_c$  é a temperatura crítica,  $T_f$  é a temperatura de fusão e  $T_p$  é a temperatura de pico. Fonte: MARQUES, MODENESI, BRACARENSE (2011).

O ciclo térmico é um fator importante a ser analisado na soldagem, pois afeta as transformações do metal base. Duas variáveis determinam o ciclo, temperatura e tempo de resfriamento. A Fig. 02 ilustra as reações de um aço baixo carbono.

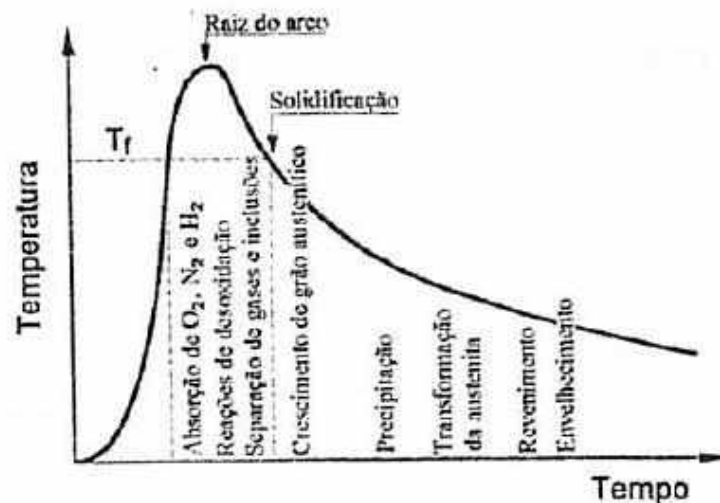


Figura 02. Ilustração do efeito do ciclo térmico de um aço baixo carbono. Fonte: MARQUES, MODENESI, BRACARENSE (2011)..

## 2.2. Características elétricas e térmicas do arco elétrico de soldagem

O arco elétrico, também chamado de plasma, é uma descarga elétrica capaz de produzir energia térmica suficiente para realizar a fusão localizada dos materiais a serem unidos. Fisicamente, é formado pela diferença de potencial entre as extremidades, ponta do eletrodo e superfície da junta, e a corrente elétrica que circula nesse espaço.

A queda do potencial pode ser dividida em três regiões (Fig. 03), a queda anódica ( $V_a$ ), queda da coluna ( $E \cdot l_a$ ) e queda catódica ( $V_c$ ).

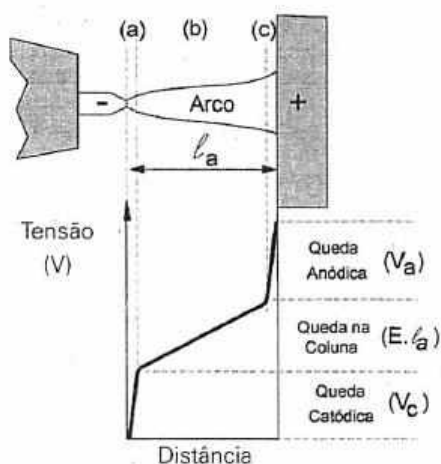


Figura 03. Ilustração da queda de potencial. Fonte: MARQUES, MODENESI, BRACARENSE (2011).

A Equação 2.1 é apresentada por Marques, Modenese e Bracarense (2011) para estimar a diferença de potencial do arco elétrico.

$$V = (V_a + V_c) + E \cdot L, \quad (2.1)$$

Em que  $E$  é a tensão específica e  $L$  o comprimento do arco.

Por esta equação é possível verificar que o comprimento de arco  $L$  influencia diretamente na tensão elétrica. A Figura 04 ilustra a variação da tensão pelo aumento do comprimento de arco. Outros fatores também influenciam, como características do eletrodo (forma, tamanho e material), tipo e vazão de gás de proteção e a própria corrente que atravessa o arco.

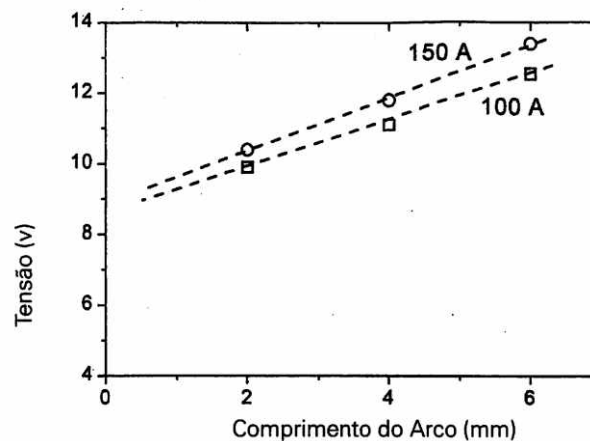


Figura 04. Variação da Tensão em função do comprimento de arco. Fonte: MARQUES, MODENESI, BRACARENSE (2011).

Nascimento et al (2007) demonstram em suas pesquisas que o cálculo de potência instantânea média, Eq. 2.2, e a energia de soldagem, Eq. 2.3, é um método adequado para estimar a energia de soldagem.

$$\bar{P}_{inst} = \frac{\sum_{i=1}^n (U_i \cdot I_i)}{n} \quad (2.2)$$

Em que  $U_i$  é a tensão do arco,  $I_i$  é a corrente e  $n$  são os pontos de amostragem durante o processo de soldagem.

$$E_s = \frac{\bar{P}_{inst}}{v_s} \quad (2.3)$$

Em que  $E_s$  é a energia específica e  $v_s$  é a velocidade de soldagem.

A energia elétrica do arco é convertida em energia térmica. O calor gerado pode ser estimado pela Eq. 2.4.

$$Q = V \cdot I \cdot t \quad (2.4)$$

Em que  $Q$  é o calor gerado,  $V$  é a tensão elétrica,  $I$  é a corrente elétrica e  $t$  é o tempo do arco aberto.

Parte do calor é perdido, seja para o meio ou para o próprio equipamento de soldagem (porta-eletrodo, gás de proteção etc), enquanto o restante é entregue a peça. Essa energia é chamada de aporte térmico. A razão entre o aporte térmico e a energia total de soldagem (Eq. 2.5) é outro parâmetro importante, chamado de eficiência térmica, e varia de processo para processo.

$$\eta = Q_a / Q, \quad (2.5)$$

$\eta$  é a eficiência térmica e  $Q_a$  é o aporte térmico.

A tab. 01 exibe valores médios de eficiência térmica para alguns processos de soldagem, conforme DIN EN 1011-1:2009.

Tabela 01. - Valores médios para a eficiência térmica nos processos GTAW, GMAW e Plasma.

<b>Processo</b>	<b><math>\eta</math></b>
GTAW	60%
GMAW	80%
Plasma	60%

Fonte: MARQUES, MODENESI, BRACARENSE (2011).



### 2.3. Processo TIG

Soldagem GTAW ou TIG (Gas Tungsten Arc Welding ou Tungsten Inert Gas) é um dos processos de soldagem a arco. Seu aspecto principal é a utilização de um eletrodo não-consumível de tungstênio e gás de proteção inerte, usualmente Argônio, Hélio ou mistura de ambos. O gás é utilizado para proteger o eletrodo, o arco e a poça de fusão contra efeitos nocivos dos gases presentes na atmosfera.

Na soldagem TIG o metal de adição pode ser dispensado, fundindo apenas o metal de base. Quando se utiliza metal de adição, este é inserido diretamente na poça de fusão manualmente pelo soldador ou alimentado automaticamente por um sistema de alimentação. Segundo Machado (1996) o processo normalmente é manual, mas também pode ser semiautomático ou automático. A Fig. 04 ilustra um processo TIG.

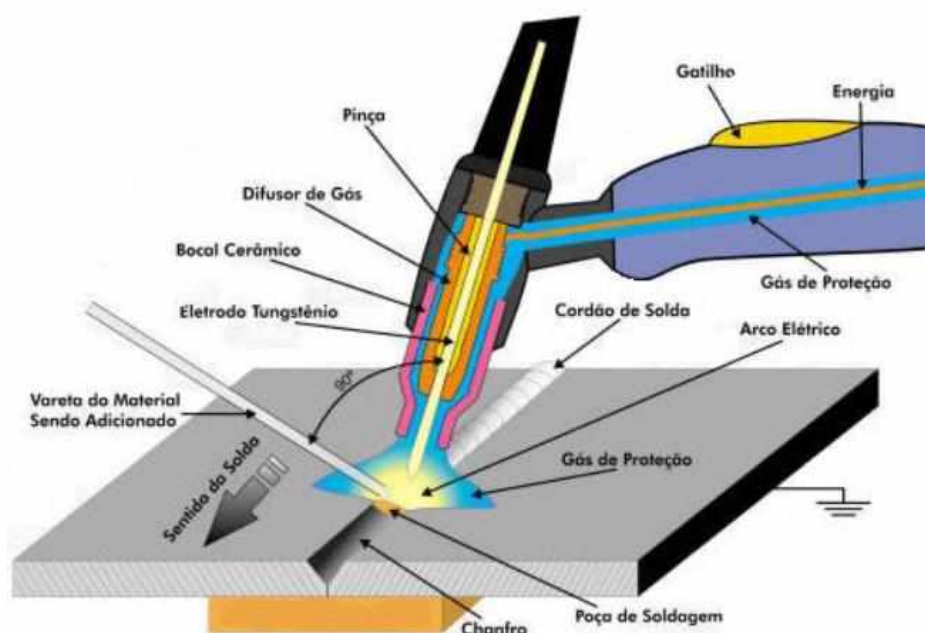


Figura 04. Ilustração de um processo TIG. Fonte: ESAB (2017).

Marques, Modenese e Bracarense (2011) afirmam que as características principais deste processo são o excelente controle de energia transferida e a proteção eficiente contra contaminação, sendo indicado para soldagem de chapas finas e de difícil soldabilidade. Outros pontos importantes é a não geração de fumos e vapores por não existir a reação metal-gás e metal-escória, resultando numa melhor visibilidade para o soldador, e a suavidade e estabilidade do arco elétrico, produzindo cordões com bom acabamento, que precisam de pouca ou nenhuma limpeza após a soldagem.

Devido ao seu custo elevado e baixa produtividade, o processo é recomendável para aplicações que priorizem a qualidade em detrimento de custo, como no caso de

ligas de alumínio, aços inoxidáveis e tubulações finas, sendo muito utilizado nas indústrias alimentícias, farmacêuticas, aeronáuticas, químicas e nucleares.

## **2.4. Transferência de calor**

Incropera et al., 2008 define a transferência de calor como a energia térmica em trânsito devido a diferença de temperaturas no espaço, ou seja, sempre que o gradiente de temperatura for diferente de zero ocorrerá o fenômeno de transferência de calor. O sentido será do ponto mais energético para o menos energético, até que ambos atinjam a mesma temperatura, momento em que o sistema entrará em equilíbrio térmico e a transferência cessará, e ocorre por três mecanismos, condução, convecção e radiação térmica (Fig. 05).

A condução é quando o calor é transferido em um meio estacionário devido a interação entre as moléculas e átomos. Temperaturas mais altas significam energias moleculares maiores, que são transferidas para as moléculas com menores energias através de choques devido aos seus movimentos aleatórios, e a transferência líquida de temperatura é chamada de difusão de energia. O que define a taxa de transferência de calor é a diferença de temperatura entre os pontos e a capacidade do material em transferir calor, que é chamada de condutividade térmica e é uma propriedade intrínseca de cada material. A taxa de transferência de calor é diretamente proporcional à diferença de temperaturas e a condutividade, e é chamada de fluxo térmico.

A convecção é o mecanismo que a transferência ocorre devido ao movimento relativo de uma superfície e um fluido, quando com temperaturas diferentes. É classificada em duas situações, convecção forçada e natural (ou livre). A forçada é quando o fluido entra em movimento devido a forças externas, enquanto a natural é quando o fluido entra em movimento devido as forças de empuxo provocadas pela própria diferença de densidade do fluido, resultantes da variação de temperatura.

O terceiro mecanismo, radiação térmica, é a transferência de calor sem um meio intermediador. O fenômeno ocorre porque todo corpo com temperatura não nula emite energia na forma de onda eletromagnética, sendo que a transferência de calor no vácuo se dá exclusivamente por este mecanismo.

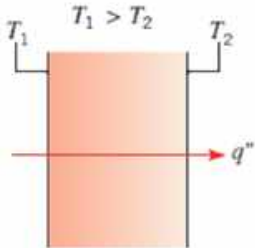

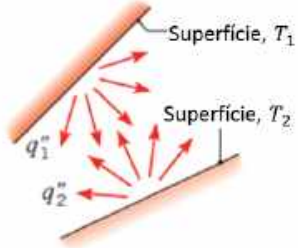
Condução através de um sólido ou de um fluido estacionário	Convecção de uma superfície para um fluido em movimento	Troca de calor líquida pela radiação entre duas superfícies
		

Figura 05. Mecanismos de transferência de calor. Fonte: INCROPERA, DE WITT, BERGMAN (2008).

## 2.5. Fluxo de calor

Scotti, Reis, Liskevych (2012) propuseram um modelo para o fluxo de calor em soldagem a arco. O modelo foi feito em duas partes, a primeira em relação a subsistência do arco e seu balanço energético, incluindo perdas e ganhos (Fig. 06) e a segunda descrevendo o fluxo de calor imposto na chapa, incluindo a forma de recebimento do calor e suas perdas pelas superfícies da poça de fusão. A Eq. 2.6 calcula o balanço energético do arco.

$$Q_{rrc} + Q_{cep} + Q_{rra} = Q_{adv} + Q_{dif} + Q_{rad}, \quad (2.6)$$

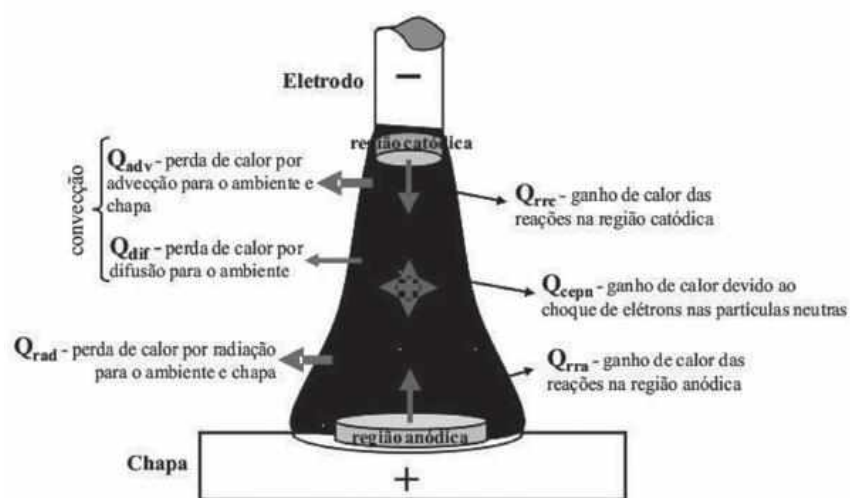


Figura 06. Esquema do balanço energético da coluna de plasma de um arco TIG. Fonte: SCOTTI, REIS, LISKEVYCH (2012).



O calor então aportado será responsável pela fusão da junta, e depois é transferido para o interior do metal base. Mas parte desse calor é perdido para o ambiente pela interação superfície-atmosfera via convecção natural e radiação.

A energia térmica difunde para o metal base, e dependendo da espessura da chapa e da condutividade térmica pode atingir a raiz. A difusão ocorre para dentro da chapa (lateralmente), resfriando as partes mais quentes perto do cordão e aquecendo as mais distantes do cordão, até que entrem em equilíbrio térmico em todo o metal base.

### 3. MATERIAIS

**Corpo de prova:** Foram utilizadas chapas de aço 1020 de dimensões 300,0 x 100,0 x 4,0 mm (Fig. 08).



Figura 08. Chapa utilizada para os ensaios.

**Pirômetro:** O pirômetro utilizado para os ensaios é da marca Icel Manaus – TD-950 (Fig. 09). A range é -20°C ~ 270°C.



Figura 09. Pirômetro utilizado nos ensaios.

**Calorímetro:** Foi utilizado calorímetro de água para avaliar a formação do campo térmico (Fig. 10). O calorímetro utilizado possui seis pinças para fixação, sendo quatro para o metal de base e dois para o acrílico. O acrílico é utilizado para permitir a visualização do nível d'água e certificar que está em contato com a parte inferior da chapa.





Figura 10. Foto do calorímetro utilizado. 1 – Calorímetro utilizado; 2 – Entrada de água vindo do reservatório; 3 – Saída de água; 4 – Suporte para manter a coluna d'água.

**Reservatório de água:** Utilizou-se um reservatório de água de 30,0 litros de capacidade (Fig. 11).



Figura 11. Reservatório de água utilizado para fornecer o fluxo de água do calorímetro.

**Sistema de aquisição:** Placa de aquisição NI USB 6215 com taxa de aquisição de dados de 2000 Hz (Fig. 12).



Figura 12. Sistema de aquisição utilizado nos ensaios.

**Termopares:** Termopares tipo K. Faixa de medição:  $-200^{\circ}\text{C}$  até  $1250^{\circ}\text{C}$ .



## 4. MÉTODOS, RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram realizados dois ensaios diferentes para estudar a influência do calorímetro na formação do campo térmico. O primeiro foi feito adquirindo temperaturas com o uso de um pirômetro, enquanto o segundo adquirindo com uso de termopares.

Para cada ensaio foram medidas temperaturas com e sem fluxo de água. Os detalhes distintos de cada um estão descritos separadamente a seguir.

### 4.1. Ensaio com pirômetro

O primeiro procedimento adotado para coleta de dados foi medir temperaturas com o pirômetro durante a soldagem. A chapa foi marcada para que fossem coletadas temperaturas dentro de três intervalos com diferentes distâncias do cordão de solda (Fig. 13).

- A posição 1 é a mais próxima do cordão, entre 1,0 a 10,0 mm de distância;
- A posição 2 é a intermediária, entre 10,0 mm e 20,0 mm;
- A posição 3 é a mais distante, acima de 20,0 mm.

A linha de aquisição é uma linha perpendicular ao cordão posicionada a 50,0 mm do início do cordão. As medições foram feitas sobre essa linha, coletando a posição 1, 2 e 3, na ordem, e com um intervalo de medição de 2,0 s, aproximadamente. O tempo de soldagem foi de 20,0 s, tempo para coletar nove temperaturas, três para cada posição.

Os parâmetros utilizados foram:

- DEP: 2,5 mm;
- Corrente ajustada na fonte: 200,0 A;
- Velocidade de Soldagem: 33,0 cm/min;
- Vazão de água: 4,33 L/min.

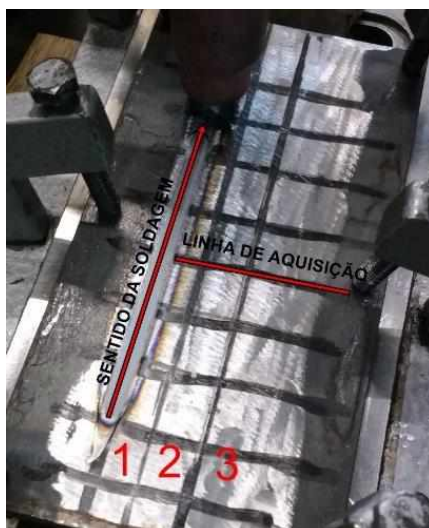


Figura 13. Delimitação dos espaços para aquisição de temperaturas.

#### 4.1.1. Resultados do ensaio com pirômetro

Todas as temperaturas medidas podem ser vistas na Tab. 02. Para tratar os dados, efetuou-se a média aritmética simples do mesmo grupo de dados, ou seja, da primeira até a última medição de cada teste, com e sem a influência do fluxo de água.

Tabela 02. Tabela de todas as temperaturas medidas durante o ensaio com pirômetro.

	Posição do Cordão	Posição 1 [°C]	Posição 2 [°C]	Posição 3 [°C]
<b>SEM CALORÍMETRO</b>				
<b>Teste 1</b>	Início	59	40	31
	Meio	83	41	37
	Fim	123	70	46
<b>Teste 2</b>	Início	111	68	52
	Meio	131	76	59
	Fim	141	69	55
<b>Teste 3</b>	Início	101	83	66
	Meio	122	90	69
	Fim	125	79	70
<b>COM CALORÍMETRO</b>				
<b>Teste 1</b>	Início	73	61	24
	Meio	105	51	40
	Fim	86	72	31
<b>Teste 2</b>	Início	69	39	69
	Meio	84	45	84
	Fim	61	50	61
<b>Teste 3</b>	Início	80	50	28
	Meio	96	39	35
	Fim	72	41	32

Os valores das médias estão exibidos na Tab. 03. Nesta tabela a coluna de início, meio e fim indica a posição da tocha em relação a linha de aquisição no momento da medição. Início era o instante em que a tocha estava no começo do cordão, mais afastado da linha de aquisição. Meio era o instante que a tocha estava passando pela linha de aquisição e fim o instante que tocha estava no final da soldagem, mais distante da linha e já passado por ela.

Tabela 03. Média aritmética simples de cada grupo de posições.

	Posição do Cordão	Posição 1 [°C]	Posição 2 [°C]	Posição 3 [°C]
<b>Sem Calorímetro</b>	Início	101	68	52
	Meio	122	76	59
	Fim	125	70	55
<b>Com Calorímetro</b>	Início	73	50	28
	Meio	96	45	36
	Fim	72	50	32

Foram gerados os gráficos das médias (Fig. 14), em que a curva A representa o ensaio sem fluxo de água e a curva B com fluxo de água.

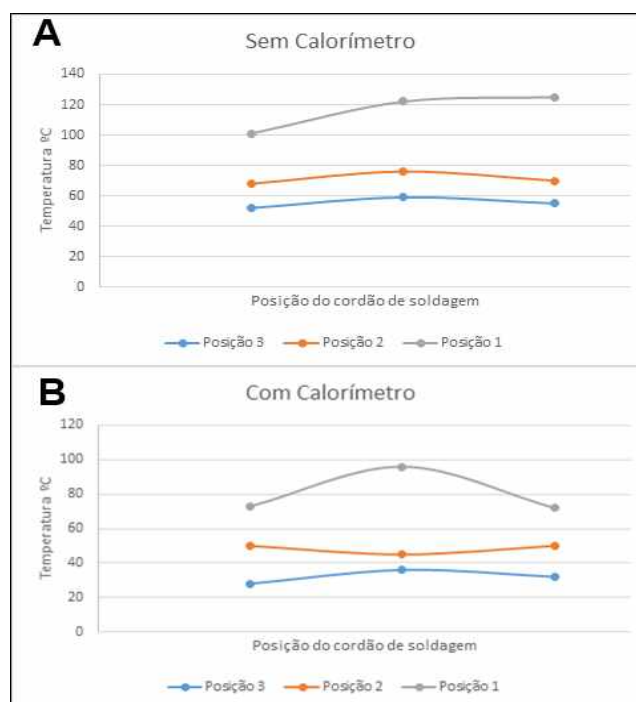


Figura 14. Gráficos das médias de temperaturas medidas com pirômetro de cada posição.

#### 4.1.2. Discussão do ensaio com pirômetro

O objetivo de coletar temperaturas durante a soldagem em uma linha (linha de aquisição) é de verificar o comportamento da variação da temperatura durante o movimento da tocha. No momento que o arco elétrico é aberto o metal de base já começa a receber calor, estando submetido a diferentes gradientes térmicos de acordo com a proximidade da tocha do ponto alvo.

Dessa forma, mantendo a medição sobre a mesma linha, deveria ser possível visualizar o efeito de diferentes gradientes térmicos na formação do campo térmico. Entretanto, a medição com o uso do pirômetro sobre essa linha foi imprecisa, tornando os valores obtidos inseguros.

As temperaturas não evidenciam a tendência da curva entre as posições, como pode se observar na curva da posição 2 com fluxo de água (Fig.14). Essa curva apresentou concavidade para baixo, o que significa que no instante mais próximo da tocha em relação a linha de aquisição a temperatura foi menor, o que não convém. Outro exemplo da falha na metodologia adotada pode ser visto na curva da posição 1 sem fluxo de água (Fig.14). Essa curva mostra que a região de medição aquece na parte final do teste, quando a tocha já está afastada da linha, mas o esperado seria que ela resfriasse lentamente, uma vez que a tocha já estava distante da linha de aquisição e o calor dessa posição deveria fluir para o interior da chapa, como vários estudos na literatura já apontaram.

As temperaturas medidas foram dispersas e imprecisas, isso se deve ao fato da metodologia empregada apresentar falhas. O pirômetro é um instrumento de uso manual, sujeito a perícia do usuário para boas medições. Outros problemas encontrados foram o laser infra-vermelho ser ofuscado pelo plasma, o pequeno intervalo entre cada medição e a sensibilidade elevada do equipamento (significa dizer que um pequeno movimento na mão implica em uma grande distância percorrida pelo laser), o que impedia de posicionar corretamente o laser, resultando na imprecisão do posicionamento. O material soldado está sujeito a gradientes intensos de temperatura, em que a junta apresenta temperaturas acima da temperatura de fusão do material enquanto o metal base permanece abaixo da temperatura crítica, o que implica que uma diferença na faixa de 1,0 a 3,0 mm no posicionamento representa uma diferença muito elevada nas medições de temperaturas. A distância entre cada região após a soldagem é na ordem de milímetros, logo qualquer variação é significativa (Fig. 15).

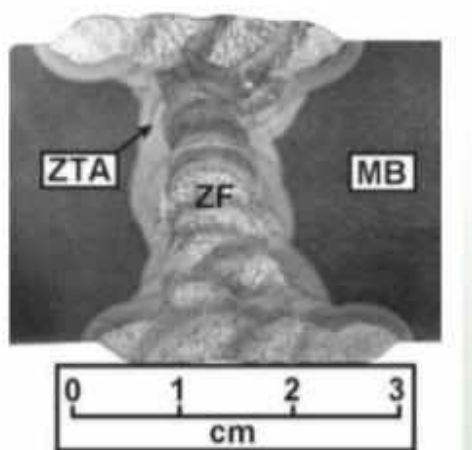


Figura 15. Tamanho das regiões formadas no metal base. Fonte: MARQUES, MODENESI, BRACARENSE (2011).

Outros fatores também influenciaram negativamente para a coleta de dados, como a necessidade de ter que passar para outra pessoa cada temperatura medida durante o processo e a atenção para o fechamento do arco em 20,0 s, para não aportar calor a mais na chapa e comprometer os resultados.

O pirômetro utilizado apresentou limitações para os testes também na sua faixa de medição, podendo medir apenas até 270 °C, entretanto as temperaturas em um ponto na ZAC superam 400 °C. Todos esses problemas encontrados tornaram a coleção de dados pouco confiável e inconclusiva. Uma nova metodologia foi proposta para resolver as dificuldades encontradas e alcançar os objetivos do trabalho.

#### 4.2. Ensaio com termopares

A nova metodologia consistiu em medir temperaturas com o uso de termopares. Foram inseridos quatro termopares tipo K no metal de base em linha. Os termopares foram nomeados por 0, 1, 2 e 3, em que o termopar 0 foi o termopar posicionado mais próximo a junta, enquanto o 3 o mais afastado. Todos foram posicionados em uma linha perpendicular à direção de soldagem, o que seria equivalente a linha de aquisição da primeira metodologia, em furos espaçados em 2,0 mm, com 2,5 mm de diâmetro e 2,0 mm de profundidade, e o primeiro furo posicionado a 6 mm de distância do cordão (Fig. 16). Apenas um lado da chapa foi medido, pois é razoável presumir que a condução térmica seja simétrica, portanto a distância de 6,0 mm da solda deveria ser suficiente para posicionar o termopar o mais próximo possível da poça de fusão, sem que fosse danificado.

As temperaturas foram adquiridas pela placa de aquisição NI USB 6215 com taxa de aquisição de dados de 2000 Hz. Foram realizados quatro cordões de solda sobrepostos, respeitando o intervalo de tempo necessário para que a chapa resfriasse até próximo da temperatura ambiente (entre 30 e 40 °C).

A aquisição de dados durou 5 minutos, aproximadamente, e compreendeu as fases antes da abertura do arco, durante a soldagem e após o fechamento do arco. As temperaturas antes da abertura serviram para certificar que a temperatura do sistema estava próxima da temperatura ambiente. Posteriormente esses valores foram descartados. A soldagem durou 20,0 segundos e o restante da medição pós-soldagem foi para medir as temperaturas durante o resfriamento do metal de base.

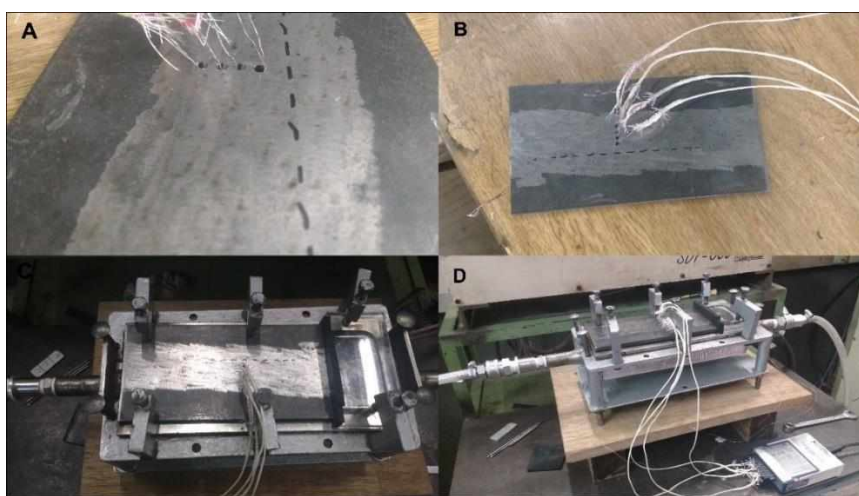


Figura 16. Detalhes da chapa de ensaio. A – Detalhes dos furos; B – Conjunto chapa e termopares; C – Fixação no calorímetro; D – bancada de ensaio.

A corrente de 200,0 A foi ajustada na fonte, o fluxo de água foi de 4,33 L/min e a velocidade de soldagem foi de 33,0 cm/min. Todos esses parâmetros foram constantes para todos os testes. Os ensaios foram separados pela DEP e presença do fluxo de água (Tab. 04).

Tabela 04. Variáveis em cada teste do ensaio com termopares.

	Fluxo de água	DEP [mm]
<b>Teste 1</b>	Sim	5
<b>Teste 2</b>	Sim	3
<b>Teste 3</b>	Não	3
<b>Teste 4</b>	Não	5

#### 4.2.1. Resultados do ensaio com termopares

A distância de 6,0 mm não foi suficiente para proteger o termopar 0, mais próximo ao cordão, e foi danificado durante a primeira solda (Fig. 17). Devido a isto apenas os termopares 1, 2 e 3 registraram temperaturas. As tabelas com os valores medidos estão nos anexos A, B, C e D.



Figura 17. Termopar 0 danificado devido ao arco de soldagem.

Os resultados foram dispostos em gráficos (Fig. 18). O tratamento de dados consistiu em apenas excluir os valores antes da abertura do arco elétrico, em que as temperaturas registradas foram entre 30 °C e 40 °C, porque essa faixa registrou valores próximos a temperatura ambiente e em regime quase permanente, e a parte final após as curvas dos termopares apresentarem um resfriamento demasiadamente lento e abaixo da temperatura crítica.

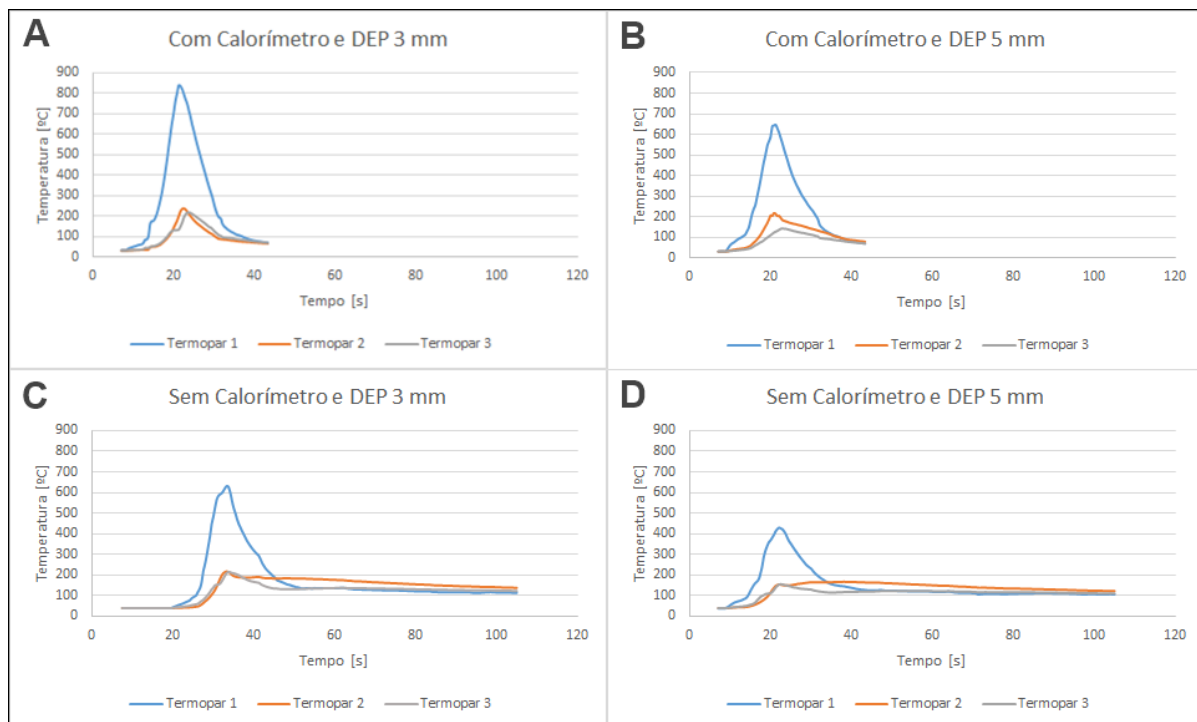


Figura 18. Gráficos das temperaturas adquiridas. A - Curva com fluxo de água e DEP 3mm; B - curva com fluxo de água e DEP 5 mm; C – Curva sem fluxo de água com DEP 3 mm; D – Curva sem fluxo de água com DEP 5 mm.

#### 4.2.2. Discussão do ensaio com termopares

Os testes realizados com o uso de termopares foram coerentes, em que as curvas com resfriamento forçado são similares, assim como as curvas sem resfriamento forçado. Essa metodologia se mostrou eficaz, uma vez que a coleta de dados para diferentes distâncias do cordão de solda foi simultânea, com alta frequência de aquisição e sem a necessidade de interferência manual, fazendo com que a nova metodologia tivesse boa repetibilidade.

Pode-se definir dois sistemas diferentes, com e sem fluxo de água. O primeiro sistema é o conjunto atmosfera-metal base-fluxo de água, enquanto o segundo é atmosfera-metal base-atmosfera.

O fluxo de água aumenta a difusividade térmica do primeiro caso, o que faz com que o calor migre rapidamente para todo o corpo, notado pelo resfriamento mais rápido nas curvas A e B (Fig. 18). As temperaturas do termopar 1 descem rapidamente, indo da  $T_p$  (temperatura de pico) até abaixo de 100 °C em 20,0 s, aproximadamente, e igualando as temperaturas dos termopares, evidenciando o resfriamento acentuado. As curvas referentes ao resfriamento natural, C e D (Fig. 18), resfriaram mais lentamente,



que pode ser visto pelo tempo necessário para as três curvas ficarem próximas e por não ficarem abaixo de 100 °C antes de 100,0 s.

Os picos das curvas A e B são maiores do que nas curvas C e D, respectivamente. Uma possível explicação para isto é que o fluxo de água colabora para que o calor seja conduzido mais rapidamente para o interior da chapa, o que faz com que as elevadas energias térmicas da poça de fusão chegue mais rapidamente ao termopares, registrando maiores temperaturas. O mesmo não acontece para os ensaios sem fluxo de água porque provavelmente o calor demora mais pra difundir, dando tempo para que ocorra mais perdas para o ambiente e outras regiões da chapa, diminuindo a parcela que chega no termopares. Outro fator que pode ter influenciado as temperaturas de pico foi o erro associado ao deslocamento de eixo da tocha entre os ensaios. Apesar dos experimentos utilizarem um movimento automático, uma pequena variação de posição da base foi percebida verificando os cordões de solda, possivelmente resultado das mudanças do parâmetro DEP, introduzindo erro de medição e possivelmente colaborando para a diferença acentuada nas temperaturas de pico.

Ainda comparando as mesmas curvas, pode-se observar que o termopar 2 das curvas sem fluxo demorou mais para resfriar e apresentaram curvas diferentes das demais. Este termopar ficou posicionado mais ao centro da chapa, enquanto os demais estavam mais próximos a borda. Esta diferença de posicionamento pode ter resultado no resfriamento mais rápido dos termopares posicionados mais próximos as extremidades porque a chapa estava fixada no suporte do calorímetro, servindo de extensão para os limites da chapa e formando um novo sistema, ar-metal base-ar-calorímetro. Também não é possível garantir que os termopares foram soldados no fundo dos furos, portanto é importante considerar que a diferença entre os pontos medidos não foi apenas na direção lateral, mas também diferenças em profundidades. Neste caso, o calorímetro e o sistema de medição interferiram nos ensaios.

A Figura 19 mostra a comparação entre as curvas do termopar 1 sob as DEPs diferentes. Quando variando a DEP, tem-se que os picos maiores foram para a DEP 3,0 mm em ambos os casos, e uma diferença na ordem de 200,0 °C. A proximidade eletrodo-peça faz com que os termopares fiquem mais suscetíveis a receberem calor por convecção e radiação, mesmo considerando que o aumento do comprimento de arco aumenta a DDP, que resulta no aumento da energia de soldagem, o que pode justificar a maior  $T_p$ . É possível ver que o incremento e o decaimento das curvas são similares, diferenciando apenas o pico, colaborando para a suspeita de que a causa principal da diferença é que os termopares recebem calor do arco elétrico, sendo que essa influência deve ser maior para as regiões próximas do que o aumento do aporte térmico devido ao maior comprimento do plasma.

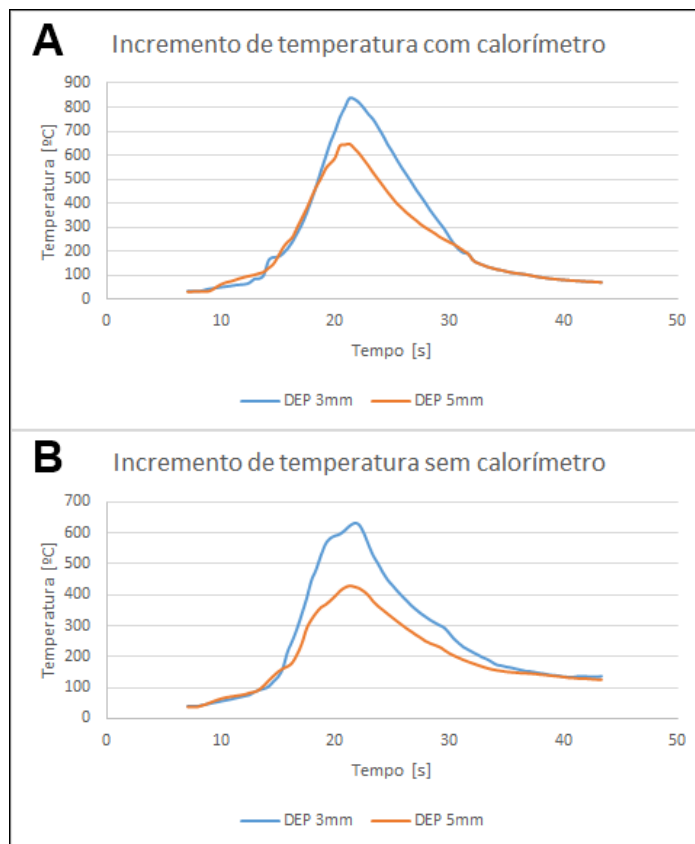


Figura 19. Incremento das temperaturas do termopar 1.

Os picos também chegaram em tempos diferentes, com um pouco de atraso nos termopares mais afastados, o que é razoável presumir que o tempo necessário para a transferência de calor seja maior. Para os termopares sob ação do resfriamento forçado os picos vieram na sequência 1 – 2 – 3, enquanto que os sem fluxo os picos dos termopares 2 e 3 coincidiram. A primeira sequência sinaliza que a maior difusividade térmica do sistema cria uma espécie de “onda térmica” mais definida, o que não acontece com o sistema de menor difusividade.

O gráficos com DEP 3,0 mm curvas A e C (Fig. 18), mostram que o termopar 3 sofreu interferência durante a parte inicial do incremento (entre 10 e 20 segundos), provavelmente devido ao menor comprimento do arco elétrico. Enquanto que os gráficos com DEP 5,0 mm, curvas B e D (Fig. 18), mostram interferências no pico do segundo termopar, provavelmente devido à maior fuga de calor por convecção e radiação.

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho teve por objetivo analisar a influência do calorímetro de água na formação do campo térmico gerado no metal base durante a soldagem TIG. Para isso, analisou-se dois sistemas: com e sem fluxo de água.

A primeira metodologia proposta foi utilizar o pirômetro para medir as temperaturas, entretanto fatores inesperados como claridade do plasma ofuscando o infra-vermelho, uso manual e pequeno intervalo de medições dificultaram a repetibilidade do processo, tornando os valores obtidos inconsistentes e imprecisos, invalidando os testes por causa da não-confiabilidade dos resultados.

Outra metodologia foi desenvolvida, de modo que as medições tivesse boa repetibilidade. Então foram utilizados quatro termopares para realizar as medições. Estes foram posicionados em uma linha de quatro furos de 2,5 mm de diâmetro e 2,0 mm de profundidade, espaçados em 2,0 mm entre, sendo que o primeiro posicionado a uma distância de 6,0 mm da junta. O posicionamento dos termopares foi estudado de modo que pudesse medir o mais próximo possível da junta soldada, entretanto a proximidade do plasma fez com que o primeiro termopar rompesse, perdendo para o restante das medições. Para a aquisição dos dados foi utilizado a placa de aquisição NI USB 6215 com taxa de aquisição de dados de 2000 Hz. O nova metodologia se mostrou adequada para os ensaios, coletando dados coerentes e satisfatórios.

Dois parâmetros foram variados para a realização dos testes, o fluxo de água e a DEP. As DEPs utilizadas foram 3,0 mm e 5,0 mm, e o propósito foi de analisar a influência da quantidade de calor aportado na chapa para a formação do campo térmico. De acordo com os resultados obtidos são feitos os seguintes comentários:

- O uso do pirômetro se mostrou inviável devido a necessidade de utilização manual e o plasma ofuscou o laser infra-vermelho, o que dificultou o correto posicionamento do laser para as medições e o atraso em coletar as temperaturas medidas, invalidando o processo;
- Nova metodologia proposta, utilizando termopares, se mostrou eficaz, com alta taxa de aquisição de dados e boa repetibilidade dos testes;
- O fluxo de água aumenta a difusividade térmica do sistema, o que contribui para conduzir o calor e intensificar o resfriamento;

- As temperaturas de pico com fluxo foram maiores do que as sem fluxo. Uma possível explicação para isto é que o fluxo de água colabora para que o calor seja conduzido mais rapidamente da poça de fusão para o interior da chapa;
- O termopar 2 dos testes sem fluxo demorou mais para resfriar, provavelmente devido ao seu posicionamento intermediário, fazendo com que fosse o último a resfriar;
- A influência das fugas de calor do plasma por convecção e radiação podem ter influenciado mais na medições do que a condução, visto que os picos maiores de temperaturas foram para comprimentos de arco menores, encurtando a distância plasma-termopar;
- O efeito “onda térmica” pode ser visualizado mais claramente nos resultados com fluxo de água, evidenciando o atraso nos picos de cada termopar (Fig. 18).

Interferências externas podem ter alterado os valores, como a radiação do plasma, geometria da chapa, calorímetro e velocidade de soldagem. Para a continuidade da investigação propõe-se alguns trabalhos futuros:

- Realizar novos testes com os termopares protegidos de efeitos colaterais do arco, para analisar apenas a condução térmica na chapa;
- Utilizar outras dimensões para a chapa, aumentando a espessura ou largura. O aumento dos parâmetros devem melhorar a difusividade térmica;
- Variar velocidade de soldagem para avaliar o tempo de condução térmica.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARÉVALO, H. D. H. Desenvolvimento e Avaliação de Calorímetros via Nitrogênio Líquido e Fluxo Contínuo (Água) para Processos de Soldagem, 2011. Dissertação para mestrado. Universidade Federal de Uberlândia - MG.

DIN EN 1011-1. *Welding - Recommendations for welding of metallic materials Part 1: General guidance for arc welding*. Versão alemã da EN 1011-1, 2009.

ESAB. MIG/MAG OR GMAW. Disponível em: <<http://www.esab.com>>. Acesso em: 14 de dez. de 2017

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

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

LISKEVYCH, O. Calor Imposto Líquido: Um Novo Conceito para Quantificação do Aporte Térmico em Soldagem a Arco. 2014. 149 p. Teste para Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia – MG.

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

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. Soldagem Fundamentos e Tecnologia. Editora UFMG, Belo Horizonte, 2011.

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.

SCOTTI, A.; REIS, R. P.; LISKEVYCH, O. Modelo Descritivo do Fluxo de Calor em Soldagem a Arco Visando o Conceito de Calor Imposto Efetivo, *Soldagem e Inspeção*, v. 17, p. 166-172, 2012.

### Anexo A – Coleção de dados para o ensaio com calorímetro e DEP 3 mm

Tempo [s]	Termopar 1	Termopar 2	Termopar 3
	Temperatura [°C]	Temperatura [°C]	Temperatura [°C]
7,083333	34,284618	31,859032	32,083587
7,5	34,160319	31,813539	32,081275
7,916667	34,057724	31,807879	32,03526
8,333333	36,117211	31,854986	32,608714
8,75	41,653574	32,648648	33,26683
9,166667	45,341356	33,228692	33,796879
9,583333	48,073125	33,664626	34,246864
10	51,046394	34,025409	34,807323
10,416667	53,391357	34,397752	35,264546
10,833333	56,168344	34,735147	35,76652
11,25	59,506031	35,140782	36,333494
11,666667	61,348841	35,427598	36,896811
12,083333	63,159444	35,617136	37,400847
12,5	69,291534	35,875379	39,034231
12,916667	85,170584	36,388825	45,259409
13,333333	86,727248	36,831538	45,822576
13,75	101,498104	37,483264	45,298336
14,166667	162,411836	48,332023	50,103962
14,583333	175,396864	51,311626	53,012736
15	177,246363	51,051883	54,251452
15,416667	190,447803	51,669864	56,11897
15,833333	211,331451	53,718333	58,980458
16,25	239,842179	57,570264	62,657011
16,666667	275,706975	60,522801	68,067736
17,083333	313,229206	67,886677	74,208922
17,5	359,227812	75,112625	81,816864
17,916667	411,851387	83,163403	90,458425
18,333333	470,385685	92,030073	99,574358
18,75	533,735639	102,081213	110,311349
19,166667	593,904848	113,576971	121,071565
19,583333	654,079143	126,613773	127,852
20	701,039148	142,336718	131,948957
20,416667	758,262499	160,078086	131,090324
20,833333	797,773791	177,296418	132,76
21,25	836,778294	198,543501	133,63343
21,666667	834,253724	222,162602	148,38241
22,083333	819,731477	234,881515	167,371889
22,5	797,063368	238,564103	191,46902
22,916667	771,031739	233,245714	208,150665
23,333333	749,60012	223,331273	216,873813
23,75	716,987995	211,762675	218,487578

24,166667	684,294814	201,212633	216,233624
24,583333	645,990049	190,533278	211,027283
25	615,136695	181,040122	206,123335
25,416667	580,903801	173,032608	199,534887
25,833333	548,099674	164,865281	193,06174
26,25	518,928362	158,281981	187,806852
26,666667	488,753219	151,89326	181,566329
27,083333	457,373683	145,402417	175,094656
27,5	430,127975	138,670298	169,275584
27,916667	401,074397	133,099619	162,275251
28,333333	370,275539	127,276983	155,413587
28,75	343,711277	120,998272	148,286615
29,166667	317,641307	116,605752	145,288132
29,583333	291,756016	112,138101	137,918061
30	259,504731	105,322526	128,686549
30,416667	230,829579	98,895948	120,507564
30,833333	207,914626	93,676742	113,631022
31,25	193,856099	89,013838	106,460768
31,666667	189,388713	88,546972	105,023259
32,083333	163,102155	87,480005	98,073623
32,5	151,062374	86,58016	96,108123
32,916667	143,562717	85,674927	95,231274
33,333333	135,731603	84,63834	94,256491
33,75	130,640866	83,631603	93,665092
34,166667	124,770795	82,540862	92,694177
34,583333	121,20754	81,575105	91,795847
35	116,326138	80,615295	90,4709
35,416667	111,996901	79,505077	88,870121
35,833333	108,870581	78,294821	87,677574
36,25	106,576775	77,42446	86,696195
36,666667	104,070327	76,642695	85,900832
37,083333	100,051235	76,02691	84,766279
37,5	96,130063	75,514916	83,541056
37,916667	92,760238	74,908704	82,2827
38,333333	89,838429	74,243036	81,027008
38,75	87,091611	73,584728	79,682074
39,166667	85,0021	72,830398	78,711075
39,583333	82,773161	72,216123	77,986612
40	81,155853	71,616827	77,062985
40,416667	79,813225	71,05984	76,142822
40,833333	78,143028	70,457559	75,215024
41,25	76,663993	69,837836	74,36798
41,666667	75,595647	69,07547	73,593127
42,083333	74,178064	68,464483	72,809019
42,5	73,486625	67,901181	71,988515
42,916667	72,131413	67,516521	71,070403

## Anexo B – Coleção de dados para o ensaio com calorímetro e DEP 5 mm

Tempo [s]	Termopar 1	Termopar 2	Termopar 3
	Temperatura [°C]	Temperatura [°C]	Temperatura [°C]
7,083333	31,790148	31,195758	31,297899
7,5	32,181125	31,251003	31,37779
7,916667	32,448183	31,35044	31,426037
8,333333	32,517345	31,363563	31,449724
8,75	32,512254	31,337571	31,927657
9,166667	38,096342	31,723794	32,450644
9,583333	51,017004	33,516563	33,336838
10	62,806539	36,185429	34,211946
10,416667	70,365973	38,837132	34,926151
10,833333	75,048891	40,469853	35,503389
11,25	80,786119	41,628397	36,137792
11,666667	87,744279	43,206563	37,23799
12,083333	93,331822	44,394886	38,225507
12,5	97,42788	45,109951	39,01658
12,916667	102,01729	46,325572	39,956301
13,333333	108,139096	47,326341	40,939439
13,75	114,151522	48,38591	41,950428
14,166667	130,567728	51,524313	43,427564
14,583333	146,869499	55,327337	45,292566
15	178,915564	59,476298	47,783608
15,416667	214,024838	67,05504	51,777748
15,833333	238,926777	74,951032	56,986643
16,25	258,679116	82,129125	62,132377
16,666667	298,657172	91,235568	66,094696
17,083333	337,85487	101,221276	71,819703
17,5	378,136234	111,88801	76,951213
17,916667	424,09958	125,903125	80,322881
18,333333	468,137282	140,328898	86,72564
18,75	502,980308	154,68243	93,345423
19,166667	544,343055	169,4313	99,54321
19,583333	567,21405	187,9823	105,23671
20	589,886987	206,548061	111,1435
20,416667	639,776075	204,768072	117,5519
20,833333	643,236838	218,41585	123,9213
21,25	647,221977	214,217615	127,999942
21,666667	629,475764	204,303852	131,949041
22,083333	608,615592	205,171236	136,954046
22,5	582,401944	194,872647	142,262373
22,916667	555,827855	184,618221	143,474754
23,333333	527,302746	181,152122	142,56691
23,75	500,397229	177,989598	141,694326



24,166667	474,192287	175,36243	139,889491
24,583333	447,260643	172,138616	137,741165
25	422,903719	169,863428	135,343872
25,416667	398,999101	167,429271	132,748682
25,833333	380,084537	165,789937	130,976673
26,25	361,465744	163,952113	128,825136
26,666667	344,672118	161,521221	126,720607
27,083333	329,054783	159,572146	125,029022
27,5	312,344582	157,933709	123,456092
27,916667	298,541737	155,227521	122,110801
28,333333	286,607847	152,93091	120,819602
28,75	274,113463	150,744908	118,917935
29,166667	259,824073	147,746897	116,670157
29,583333	249,149363	144,918566	115,19835
30	238,659378	142,782371	113,385547
30,416667	229,019751	140,804834	111,778227
30,833333	216,363689	138,88409	109,575891
31,25	202,521654	136,217212	107,176874
31,666667	189,388713	133,629772	105,023259
32,083333	163,102155	131,385593	98,073623
32,5	151,062374	128,687335	96,108123
32,916667	143,562717	126,754113	95,231274
33,333333	135,731603	124,340492	94,256491
33,75	130,640866	122,026752	93,665092
34,166667	124,770795	119,009413	92,694177
34,583333	121,20754	116,048624	91,795847
35	116,326138	112,807024	90,4709
35,416667	111,996901	109,409453	88,870121
35,833333	108,870581	106,553661	87,677574
36,25	106,576775	104,141593	86,696195
36,666667	104,070327	102,276544	85,900832
37,083333	100,051235	100,282796	84,766279
37,5	96,130063	97,723514	83,541056
37,916667	92,760238	95,070062	82,2827
38,333333	89,838429	92,663031	81,027008
38,75	87,091611	90,815616	79,682074
39,166667	85,0021	89,544601	78,711075
39,583333	82,773161	88,546972	77,986612
40	81,155853	87,480005	77,062985
40,416667	79,813225	86,58016	76,142822
40,833333	78,143028	85,674927	75,215024
41,25	76,663993	84,63834	74,36798
41,666667	75,595647	83,631603	73,593127
42,083333	74,178064	82,540862	72,809019
42,5	73,486625	81,575105	71,988515
42,916667	72,131413	80,615295	71,070403

### Anexo C – Coleção de dados para o ensaio sem calorímetro e DEP 3 mm

Tempo [s]	Termopar 1	Termopar 2	Termopar 3
	Temperatura [°C]	Temperatura [°C]	Temperatura [°C]
7,5	38,846169	38,880676	38,934766
7,916667	38,861069	38,887648	38,930314
8,333333	38,909196	38,872358	38,970512
8,75	38,931896	38,893426	38,963136
9,166667	38,963973	38,894496	38,97866
9,583333	38,94024	38,89874	38,985469
10	38,952527	38,859734	38,993558
10,416667	38,973861	38,851459	38,978757
10,833333	38,952092	38,863263	38,982633
11,25	38,952733	38,873464	38,979777
11,666667	38,957711	38,85769	38,994779
12,083333	38,960518	38,882881	38,974273
12,5	38,962296	38,859478	38,98491
12,916667	38,954798	38,865736	38,956896
13,333333	38,97847	38,863063	38,99339
13,75	38,994491	38,843646	39,001252
14,166667	39,017192	38,814588	38,980824
14,583333	39,041563	38,830336	38,985379
15	39,092254	38,85026	38,99924
15,416667	39,080079	38,864429	39,005947
15,833333	39,116728	38,86075	38,999704
16,25	39,121556	38,850424	39,044396
16,666667	39,187812	38,840221	39,028134
17,083333	39,221118	38,833901	39,038133
17,5	39,253413	38,846388	39,053415
17,916667	39,259783	38,838305	39,047898
18,333333	39,27088	38,81653	39,072285
18,75	39,250191	38,846196	39,042966
19,166667	39,238766	38,84013	39,06371
19,583333	39,243329	38,809254	39,066409
20	42,830075	39,052535	40,197732
20,416667	46,094021	39,678335	41,228533
20,833333	49,292799	40,085635	42,209429
21,25	52,725114	40,467847	43,195297
21,666667	55,905717	40,766144	44,204281
22,083333	58,77538	41,06342	45,129174
22,5	61,777458	41,327494	46,104064
22,916667	65,467761	41,665027	47,186626
23,333333	69,066969	42,021139	48,118214
23,75	72,514736	42,364465	49,097384
24,166667	76,290889	42,769047	50,32661

24,583333	85,628114	43,401013	53,002316
25	91,707089	44,320091	54,829506
25,416667	96,451139	45,233536	56,313343
25,833333	102,99691	46,084234	57,907408
26,25	119,33852	47,632592	60,7281
26,666667	134,75738	51,347094	67,172833
27,083333	162,865858	56,929543	73,622791
27,5	215,709787	63,693108	78,829354
27,916667	251,648805	70,973211	87,348381
28,333333	291,177026	77,640648	96,047679
28,75	339,636507	85,666522	106,343386
29,166667	388,300145	94,152922	117,354149
29,583333	445,949832	104,076972	129,544817
30	482,46125	114,634908	138,695366
30,416667	527,33566	127,445846	150,158613
30,833333	565,478976	143,99737	152,133562
31,25	583,722191	161,968914	153,343063
31,666667	591,43144	182,346366	158,549585
32,083333	597,032154	198,169843	169,783167
32,5	608,603519	209,261084	183,588956
32,916667	622,642482	214,80688	198,434742
33,333333	631,96402	216,928815	210,008063
33,75	627,662743	214,895982	215,304417
34,166667	601,128614	209,202274	213,068068
34,583333	563,07027	201,08597	210,313646
35	527,403718	195,624546	208,491714
35,416667	501,620231	192,226592	205,87325
35,833333	473,205708	190,252037	202,791914
36,25	449,294178	188,882593	199,465365
36,666667	431,728389	188,581468	194,414063
37,083333	413,813242	187,841273	189,177875
37,5	397,183068	187,20947	185,05976
37,916667	381,861957	187,451424	181,13901
38,333333	365,573327	187,648131	177,070371
38,75	352,464654	187,57827	173,520343
39,166667	340,06651	187,641089	170,564569
39,583333	329,113906	188,319548	168,55645
40	318,77328	189,148653	166,570432
40,416667	309,487721	189,612921	165,313961
40,833333	301,34494	190,235734	163,765286
41,25	293,09837	190,69363	162,15776
41,666667	275,75821	188,982798	156,27368
42,083333	257,485594	186,898874	151,306397
42,5	243,736073	185,310463	147,781616
42,916667	230,896856	184,648679	144,488284
43,333333	222,188387	184,065092	141,709747

43,75	213,811474	183,795194	139,690676
44,166667	205,9821	183,72727	137,385528
44,583333	197,634719	183,269107	135,772698
45	191,28406	183,05686	134,136449
45,416667	182,181883	182,833577	133,794099
45,833333	173,467116	182,832106	133,349966
46,25	170,940458	183,044421	132,28545
46,666667	167,025238	183,102901	131,541754
47,083333	164,510198	183,365124	131,43
47,5	160,666786	183,771025	131,505553
47,916667	157,160558	183,769676	131,237622
48,333333	153,485347	183,699863	130,915087
48,75	152,434255	183,525746	130,999877
49,166667	149,643996	183,392614	130,953211
49,583333	146,694485	182,846415	130,67898
50	144,587151	182,562619	130,821791
50,416667	141,201131	182,284941	131,177351
50,833333	140,105033	182,274769	131,435584
51,25	138,435608	182,228825	131,49601
51,666667	135,028643	182,095653	132,39184
52,083333	134,09688	181,906827	132,582919
52,5	133,869361	181,701358	132,881649
52,916667	136,00708	181,673224	133,230505
53,333333	135,767236	181,450004	133,657073
53,75	135,658777	181,233329	134,018498
54,166667	134,717854	180,903823	134,078212
54,583333	134,574113	180,40576	133,908198
55	136,777656	179,872097	134,009571
55,416667	136,103012	179,537648	134,105519
55,833333	135,627271	179,321922	134,222529
56,25	135,721526	179,157463	134,497017
56,666667	135,716918	179,012743	134,733863
57,083333	135,410725	178,646123	134,948371
57,5	135,264587	178,246441	135,125833
57,916667	135,42788	177,879368	135,350499
58,333333	135,402808	177,521162	135,479721
58,75	134,935081	177,092776	135,584662
59,166667	135,102108	176,675178	135,854787
59,583333	135,345244	176,375554	136,124373
60	135,662205	176,049396	136,33298
60,416667	135,957914	175,74816	136,484998
60,833333	136,265938	175,3914	136,702961
61,25	136,683127	175,123518	136,94581
61,666667	136,852214	174,874876	137,110447
62,083333	137,147045	174,493676	136,971195
62,5	136,431208	173,993578	136,790358

62,916667	134,847064	173,204755	136,340519
63,333333	133,594087	172,30107	136,062484
63,75	133,023178	171,711801	135,902015
64,166667	131,597901	171,091628	135,486123
64,583333	130,424448	170,253204	135,235146
65	130,217326	169,547866	135,330617
65,416667	129,181177	169,073932	135,10504
65,833333	129,321111	168,656297	135,189694
66,25	129,389546	168,500245	135,181917
66,666667	129,069065	168,106436	135,110846
67,083333	128,652506	167,596609	134,979519
67,5	128,338406	167,077052	134,920604
67,916667	128,243655	166,676644	134,841261
68,333333	128,033399	166,306488	134,740501
68,75	127,732939	165,860833	134,611712
69,166667	127,475895	165,398843	134,473571
69,583333	127,159831	164,887102	134,342908
70	126,861348	164,450597	134,225852
70,416667	126,562123	164,011907	134,063352
70,833333	126,299754	163,542639	133,929367
71,25	126,197562	163,14751	133,841542
71,666667	125,821968	162,703757	133,66993
72,083333	125,635978	162,275099	133,552432
72,5	125,34953	161,853486	133,428692
72,916667	125,085477	161,408755	133,256464
73,333333	125,000199	160,999363	133,195928
73,75	124,993135	160,666448	133,140907
74,166667	125,178434	160,320634	133,077572
74,583333	124,806897	159,881141	132,839186
75	124,671493	159,516271	132,673573
75,416667	124,668619	159,204637	132,566648
75,833333	124,401723	158,898169	132,418309
76,25	124,107237	158,41705	132,278618
76,666667	123,715069	157,963264	132,041915
77,083333	123,387151	157,459582	131,861027
77,5	122,975527	157,039661	131,664047
77,916667	122,775451	156,580735	131,500292
78,333333	122,432401	156,237163	131,287643
78,75	122,020903	155,78669	131,086866
79,166667	121,605822	155,326137	130,895315
79,583333	121,348035	154,878164	130,731865
80	120,921051	154,496122	130,545578
80,416667	120,327225	154,098985	130,235033
80,833333	120,333415	153,688741	130,177934
81,25	120,410374	153,450849	130,154481
81,666667	120,749089	153,285603	130,15313

82,083333	121,071459	153,160599	130,083451
82,5	120,388253	152,798034	129,685054
82,916667	120,072757	152,31533	129,480622
83,333333	120,193976	151,851635	129,464413
83,75	119,915675	151,536513	129,263377
84,166667	118,005584	150,931245	128,345612
84,583333	117,122392	150,187292	127,994369
85	117,065741	149,843059	127,959144
85,416667	116,981578	149,635462	127,90068
85,833333	116,464323	149,272997	127,585972
86,25	116,342992	148,823764	127,505069
86,666667	116,324924	148,515403	127,470959
87,083333	116,466538	148,300171	127,441606
87,5	116,575115	148,149323	127,384149
87,916667	116,638698	147,894509	127,282116
88,333333	116,529502	147,641495	127,130567
88,75	116,44855	147,249958	127,05286
89,166667	116,515726	146,997009	126,955169
89,583333	116,481234	146,718322	126,814424
90	116,262807	146,404298	126,603574
90,416667	115,947169	146,016779	126,427849
90,833333	115,795779	145,664542	126,249558
91,25	115,678053	145,371853	126,205524
91,666667	115,686846	145,03855	126,07889
92,083333	116,026134	144,820116	125,756888
92,5	115,746484	144,667635	125,584886
92,916667	116,121083	144,554556	125,360677
93,333333	116,108433	144,360015	125,084625
93,75	114,528706	143,967659	124,86252
94,166667	113,299563	143,479125	124,5101
94,583333	112,817481	143,133185	124,363543
95	112,906658	142,866158	124,305353
95,416667	113,25824	142,738664	124,272623
95,833333	113,54465	142,577689	124,334356
96,25	113,983974	142,310972	124,431614
96,666667	114,533372	142,129048	124,595303
97,083333	115,258524	142,023644	124,768868
97,5	116,019258	141,941999	124,925768
97,916667	116,355293	141,880511	125,006076
98,333333	116,709288	141,738297	124,996099
98,75	116,770518	141,572917	124,906568
99,166667	116,399845	141,341948	124,674872
99,583333	115,642268	140,851116	124,267243
100	115,115577	140,371655	124,144995
100,41667	114,731832	140,026292	123,941266
100,83333	114,495095	139,660289	123,753026

101,25	114,534242	139,433403	123,675785
101,66667	114,688625	139,306418	123,649433
102,08333	114,767621	139,185953	123,605471
102,5	114,743275	139,001968	123,496423
102,91667	114,580799	138,792251	123,324005
103,33333	114,426825	138,577261	123,159202
103,75	113,95701	138,271291	122,894842
104,16667	113,599363	137,900919	122,632005
104,58333	113,386421	137,598133	122,472578
105	113,214884	137,226219	122,425512

#### Anexo D – Coleção de dados para o ensaio sem calorímetro e DEP 5 mm

Tempo [s]	Termopar 1	Termopar 2	Termopar 3
	Temperatura [°C]	Temperatura [°C]	Temperatura [°C]
7,083333	37,888605	38,686179	38,641871
7,5	37,894511	38,663631	38,625852
7,916667	37,70361	38,651042	38,609998
8,333333	37,547431	38,595981	38,562864
8,75	37,530816	38,582646	38,56772
9,166667	41,942235	38,91184	39,498752
9,583333	46,725688	39,513406	40,214823
10	52,992074	40,238314	41,070544
10,416667	58,772225	41,068139	42,039762
10,833333	63,823805	41,90567	43,139838
11,25	67,725044	42,488598	44,147013
11,666667	70,407365	42,947338	44,970296
12,083333	73,055188	43,190935	45,685828
12,5	75,021293	43,273152	46,3137
12,916667	77,984514	43,385981	47,118636
13,333333	82,620482	43,68677	48,367962
13,75	85,953983	44,213265	49,414274
14,166667	92,718395	45,007908	50,902863
14,583333	105,82138	46,509801	53,004358
15	122,437154	48,850633	55,511495
15,416667	136,960231	51,122753	58,04703
15,833333	151,273802	53,656671	61,641366
16,25	161,47818	56,81602	67,110408
16,666667	168,445002	60,399329	76,775843
17,083333	180,720585	64,87281	85,513116
17,5	207,74169	69,376446	93,32062
17,916667	243,156636	74,535205	98,983253
18,333333	291,190603	80,289233	102,59511

18,75	319,93893	86,853575	107,756955
19,166667	341,771218	94,223292	109,456035
19,583333	359,436918	103,971548	109,625545
20	368,611487	114,903192	111,723612
20,416667	381,728862	126,957077	118,303011
20,833333	396,074473	138,492873	128,009173
21,25	412,511477	146,766537	139,206265
21,666667	423,274488	151,479342	147,968498
22,083333	429,291943	153,419032	153,82035
22,5	426,524254	153,164605	155,431714
22,916667	421,77457	151,343319	154,402368
23,333333	411,979578	149,702671	152,113717
23,75	398,373964	148,518005	150,212674
24,166667	378,814592	148,998652	148,796004
24,583333	363,703431	149,275267	146,297816
25	351,704414	150,633979	143,889211
25,416667	338,944032	151,584973	141,152719
25,833333	326,924276	153,008468	139,440035
26,25	314,757442	154,776292	138,280652
26,666667	302,986236	156,494734	136,454726
27,083333	291,692389	157,351463	134,93621
27,5	281,301021	158,544996	133,423772
27,916667	270,573056	159,699381	132,42357
28,333333	261,12442	160,869424	131,805365
28,75	250,252008	162,004158	130,942129
29,166667	243,130441	163,000228	130,397491
29,583333	237,063906	164,019652	129,764153
30	231,213809	164,91714	129,290106
30,416667	220,863211	165,026905	126,711847
30,833333	210,884455	164,820158	124,437349
31,25	203,169644	164,821381	122,827283
31,666667	196,176321	164,8409	121,345161
32,083333	189,373373	164,682028	119,916428
32,5	183,476984	164,2562	118,591688
32,916667	177,985986	164,268797	117,861013
33,333333	172,513302	164,3835	116,882312
33,75	167,628561	164,376071	116,021825
34,166667	162,654489	164,517108	115,196368
34,583333	158,818016	164,712641	114,779892
35	155,729601	164,986776	114,715907
35,416667	153,523221	165,337192	114,863071
35,833333	151,268509	165,642244	114,967547
36,25	149,748541	165,923847	115,265801
36,666667	148,495178	165,995559	115,633728
37,083333	147,075377	166,156936	116,006058
37,5	146,347494	166,316333	116,521951



37,916667	145,680928	166,570356	116,999215
38,333333	144,423094	166,684367	117,179324
38,75	142,321534	166,394767	117,004936
39,166667	141,064823	166,348354	117,108997
39,583333	139,300835	166,180172	116,98765
40	137,565103	165,882554	116,937835
40,416667	136,149066	165,599994	116,986045
40,833333	134,409191	165,43006	117,274484
41,25	131,902682	165,17422	117,755316
41,666667	131,057914	164,981331	118,362623
42,083333	129,581977	164,637712	118,487792
42,5	128,779125	164,419665	118,623804
42,916667	128,376363	164,160766	118,951656
43,333333	127,421997	163,896495	118,874875
43,75	126,260091	163,452581	118,696033
44,166667	125,443252	163,044671	118,767916
44,583333	124,804229	162,780942	118,98611
45	125,075725	162,57424	119,192597
45,416667	125,274498	162,429603	119,605599
45,833333	125,3262	162,28809	120,016393
46,25	125,714142	162,251107	120,465873
46,666667	126,234096	162,19053	120,82048
47,083333	126,570943	162,145659	121,262431
47,5	126,215527	161,929055	121,331568
47,916667	125,216728	161,180769	121,23227
48,333333	124,42534	160,407891	121,251474
48,75	123,95222	159,945244	121,269851
49,166667	123,825885	159,609725	121,408779
49,583333	123,759221	159,351555	121,524691
50	123,325352	159,082544	121,53776
50,416667	122,850134	158,610755	121,53624
50,833333	122,886398	158,232588	121,638289
51,25	122,836034	157,934299	121,750164
51,666667	122,690887	157,574553	121,811193
52,083333	122,64677	157,214516	121,951259
52,5	122,574725	156,893087	122,029803
52,916667	122,257043	156,517539	121,986711
53,333333	121,951758	156,080047	121,913477
53,75	121,306859	155,525945	121,701942
54,166667	120,584727	154,996592	121,45259
54,583333	120,388479	154,631057	121,499622
55	120,245794	154,245311	121,639212
55,416667	120,198594	153,859252	121,719635
55,833333	120,3588	153,619684	121,798991
56,25	120,717526	153,457946	121,995077
56,666667	120,581473	153,211702	121,931981

57,083333	120,61578	152,875231	121,912162
57,5	120,673201	152,50421	121,919674
57,916667	120,639765	152,151369	121,935231
58,333333	120,597046	151,794594	121,95527
58,75	120,246957	151,392373	121,837596
59,166667	119,947333	150,917034	121,757306
59,583333	119,371323	150,387547	121,541901
60	118,4897	149,778216	121,264546
60,416667	118,10034	149,250956	121,106214
60,833333	117,928475	148,897012	121,071224
61,25	117,865175	148,640916	121,034403
61,666667	117,558196	148,337856	120,889444
62,083333	117,235849	147,926627	120,771729
62,5	117,41659	147,588113	120,843668
62,916667	117,791585	147,423106	121,049329
63,333333	118,184831	147,325774	121,147456
63,75	118,728726	147,162502	121,377481
64,166667	119,047704	146,951254	121,381673
64,583333	117,914138	146,454078	120,8546
65	116,957847	145,850972	120,381442
65,416667	115,321019	145,133293	119,697092
65,833333	114,191197	144,380063	119,289761
66,25	113,735701	143,89685	119,156582
66,666667	113,49476	143,461508	119,094542
67,083333	113,376242	143,197672	119,066752
67,5	113,548344	143,001677	119,056485
67,916667	113,542042	142,817016	118,98678
68,333333	113,330642	142,523308	118,829699
68,75	113,114529	142,119091	118,741734
69,166667	112,803836	141,714611	118,577255
69,583333	112,130749	141,180826	118,357713
70	111,630571	140,750982	118,077905
70,416667	111,163208	140,351141	117,903365
70,833333	110,276913	140,09162	117,146079
71,25	105,884703	138,707515	115,606876
71,666667	105,799945	138,138026	115,531191
72,083333	106,909719	138,236655	115,963495
72,5	107,775579	138,360909	116,326983
72,916667	108,530821	138,295702	116,683497
73,333333	108,90898	138,181555	116,818801
73,75	108,526648	137,755635	116,612054
74,166667	108,412854	137,424492	116,540086
74,583333	108,519441	137,12341	116,493356
75	108,822554	136,902718	116,466247
75,416667	108,561531	136,548306	116,387189
75,833333	108,202896	136,252872	116,148392

76,25	107,738909	135,820958	115,899787
76,666667	107,623895	135,522499	115,790755
77,083333	107,278255	135,186152	115,65631
77,5	107,103487	134,960383	115,479088
77,916667	107,311377	134,761023	115,515864
78,333333	107,454309	134,591849	115,485738
78,75	107,944622	134,442501	115,533579
79,166667	108,434556	134,435337	115,569747
79,583333	108,748073	134,380673	115,543343
80	108,901393	134,252985	115,47144
80,416667	108,981659	134,053302	115,373412
80,833333	109,010436	133,821622	115,276032
81,25	109,120079	133,57376	115,231438
81,666667	109,556129	133,33943	115,299952
82,083333	109,904043	133,162296	115,382037
82,5	110,185282	133,024438	115,407649
82,916667	110,158106	132,867245	115,450851
83,333333	110,172094	132,59183	115,456975
83,75	110,397181	132,357657	115,446929
84,166667	110,192141	132,122075	115,416389
84,583333	110,49168	131,824597	115,3945
85	110,717305	131,688201	115,327983
85,416667	110,80184	131,502189	115,254391
85,833333	110,822991	131,280923	115,097729
86,25	110,92828	131,030064	115,049361
86,666667	111,197823	130,822894	114,936615
87,083333	111,322985	130,651053	114,881875
87,5	111,15694	130,450308	114,733159
87,916667	110,947312	130,14335	114,579581
88,333333	110,906945	129,872952	114,448722
88,75	111,055306	129,68716	114,422142
89,166667	111,101627	129,544304	114,413937
89,583333	110,89669	129,318655	114,372677
90	110,414752	129,061246	114,212525
90,416667	109,922731	128,803393	114,037738
90,833333	109,517477	128,510153	113,76442
91,25	109,289553	128,165163	113,552209
91,666667	109,176532	127,921137	113,449833
92,083333	109,375754	127,695991	113,41307
92,5	109,48204	127,550237	113,324723
92,916667	109,548009	127,407076	113,265417
93,333333	109,4621	127,268999	113,142866
93,75	109,416396	127,102013	113,066414
94,166667	109,062602	126,897685	112,814286
94,583333	108,916211	126,627366	112,68175
95	108,891691	126,435254	112,542258

95,416667	108,290268	126,149207	112,215797
95,833333	107,379227	125,631781	111,870772
96,25	106,716292	125,119257	111,600132
96,666667	106,268286	124,755126	111,41794
97,083333	106,040634	124,552178	111,305171
97,5	105,938916	124,344191	111,213135
97,916667	106,062018	124,274109	111,195082
98,333333	106,22265	124,24942	111,22231
98,75	106,372219	124,19975	111,206417
99,166667	106,240688	124,122265	111,097966
99,583333	106,341495	123,992025	111,0703
100	106,456915	123,884727	111,025732
100,41667	106,313431	123,748689	110,873306
100,83333	105,833878	123,404749	110,646706
101,25	105,613219	123,132353	110,494105
101,66667	105,551201	122,895942	110,467631
102,08333	105,748158	122,801034	110,476818
102,5	105,839292	122,697584	110,461055
102,91667	105,916259	122,579835	110,419725
103,33333	106,010829	122,451372	110,413427
103,75	106,124283	122,299247	110,42327
104,16667	106,230469	122,188587	110,441126
104,58333	105,924095	122,029979	110,250434
105	105,85328	121,813796	110,166238