

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM CALORÍMETRO COM VAZÃO CONTÍNUA
DE ÁGUA PARA AVALIAÇÃO DO RENDIMENTO TÉRMICO EM PROCESSOS DE
SOLDAGEM

por

Pedro Vasata Sgarbi

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Setembro de 2013

CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM CALORÍMETRO COM VAZÃO CONTÍNUA
DE ÁGUA PARA AVALIAÇÃO DO RENDIMENTO TÉRMICO EM PROCESSOS DE
SOLDAGEM

por

Pedro Vasata Sgarbi
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da
Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. José Antônio Esmério Mazzaferro

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez, PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho, FEMEC / UFU

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider, PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Rogério José Marczak
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 02 de Setembro de 2013

*“Eu não vou estudá, vou só trabáia. Só trabáia!”
Estava enganado Pedro quando proferiu estas palavras.*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Mazzaferro, pela orientação deste trabalho, pelo conhecimento e experiência transmitidos.

Ao Prof. Ruben, que esteve sempre à disposição para contribuir com o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Schneider, por ter contribuído desde início deste trabalho com ideias.

À equipe de pós-graduandos do LS&TC, pela colaboração na realização dos experimentos de soldagem.

À minha família e à minha noiva, que estiverem sempre presentes, sempre me apoiaram nesta longa caminhada e que me suportaram nos momentos mais insanos.

À minha irmã Mariana, que mesmo sem conhecer nada de soldagem corrigiu todo este trabalho.

Ao meu amigo Paulo, que incentivou a minha inscrição neste programa de Mestrado e que foi meu colega durante esta caminhada.

RESUMO

O aporte térmico, ou imposição de calor, é uma das características com grande importância nos processos de soldagem, pois ela está diretamente relacionada com as propriedades mecânicas e as transformações metalúrgicas da junta soldada. Neste sentido, este trabalho propõe o projeto, a construção e a validação de um calorímetro com uma vazão contínua de água para avaliação do aporte térmico e da eficiência térmica em processos de soldagem a arco elétrico que seja de baixo custo, adaptável aos diferentes processos de soldagem, de simples operação e fácil movimentação. Foram realizados experimentos com três processos, sendo eles: soldagem a arco com gás de proteção e eletrodo consumível (GMAW – *Gas Metal Arc Welding*), soldagem a arco com eletrodo não consumível e gás de proteção (GTAW – *Gas Tungsten Arc Welding*) e soldagem ao arco submerso (SAW – *Submerged Arc Welding*). As atividades realizadas visam identificar o efeito sobre a eficiência térmica devido à variação de alguns dos parâmetros de soldagem bem como identificar características intrínsecas do calorímetro construído. Para o processo de soldagem GMAW verificou-se um rendimento médio do arco de 72,82%, com uma eficiência média de 71,10% especificamente para o processo GMAW com transferência metálica goticular e de 76,26% para transferência metálica por curto-circuito. O processo de soldagem GTAW apresentou uma eficiência térmica média de 68,44% e para o processo SAW foi observado um rendimento do arco de 91,05%. Os resultados obtidos se mostraram coerentes quando comparados aos valores reportados anteriormente por outros autores e também apresentaram uma boa repetitividade, sendo de 4,5% a maior diferença observada entre cordões de solda de um mesmo experimento.

Palavras-chave: Calorimetria; Eficiência Térmica; Aporte Térmico; Calorímetro de água; Soldagem a arco.

ABSTRACT

Heat input is an important welding process characteristic since it is directly related to the mechanical properties and metallurgical transformations of the welded joint. This paper aims to present the project, construction and validation of a calorimeter with continuous water flow to evaluate the heat input and the thermal efficiency of arc welding processes. The proposed calorimeter shall have a low cost, versatile, easy to handle and to operate. Experiments were carried out with gas metal arc welding (GMAW), gas tungsten arc welding (GTAW) and submerged arc welding (SAW). These activities aimed to identify the effect that changes of certain welding parameters perform on the thermal efficiency and to identify intrinsic characteristics of the proposed calorimeter. For GMAW processes it was obtained a global thermal efficiency of 72.82%. For this process, the results were different according to the metal transfer: 71.10% for GMAW with spray transfer and 76.26% for GMAW with short circuit transfer. The average thermal efficiency obtained for the GTAW was of 68.44% and for the SAW process was of 91.05%. The experiments results showed to be consistent when compared to previously reported values by other authors and also showed good repeatability, where the large difference observed between weldments of the same experiment was of 4.5%.

Keywords: Calorimetry, Thermal Efficiency, Heat Input, Water Calorimeter, Arc Welding.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Processos de Soldagem.....	4
2.2	Cálculo da Potência do Arco Elétrico e da Eficiência Térmica.....	8
2.3	Mecanismos de Transferência de Calor.....	11
2.4	Modelos de Transferência de Calor na Soldagem	12
2.5	Perdas de Calor Durante o Processo de Soldagem	14
2.6	Calorimetria	16
2.7	Valores de Eficiência Térmica Obtidas em Estudos Anteriores.....	23
3	MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS	27
3.1	Corpos de Prova.....	27
3.2	Corpo do Calorímetro	28
3.3	Isolamento Térmico do Corpo de Prova.....	29
3.4	Acoplamento entre o Corpo do Calorímetro e o Corpo de Prova.....	31
3.5	Sistema de Alimentação de Água	32
3.6	Sistema de Monitoramento de Temperatura.....	33
3.7	Sistema de Monitoramento da Soldagem	35
3.8	Equipamentos de Soldagem.....	36
3.9	Metodologia Utilizada para Medição da Vazão de Água do Calorímetro.....	47
3.10	Metodologia de Cálculo da Potência Elétrica.....	49
3.11	Metodologia de Cálculo da Energia de Soldagem.....	51
3.12	Metodologia para Obtenção do Aporte Térmico	51
3.13	Planejamento Experimental	53
3.14	Testes Iniciais	56
4	PROJETO, CONSTRUÇÃO E OPERAÇÃO DO CALORÍMETRO	58

5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	68
5.1	Experimentos com o Processo de Soldagem GMAW	68
5.2	Experimentos com o Processo de Soldagem GTAW	73
5.3	Experimentos com o Processo de Soldagem SAW	76
5.4	Análise dos Erros e Incertezas	79
5.5	Análise Financeira	80
6	CONCLUSÕES.....	81
7	TRABALHOS FUTUROS	82
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Esquema representativo da soldagem MIG/MAG.	5
Figura 2.2	Esquema representativo da soldagem TIG com corte da tocha de soldagem.	7
Figura 2.3	Vista em corte do processo de soldagem ao arco submerso.	8
Figura 2.4	Representação dos mecanismos de transferência de calor por condução, convecção e radiação.	12
Figura 2.5	Desenho ilustrativo da distribuição de energia em um processo de soldagem a arco elétrico.	15
Figura 2.6	Transferência de calor na peça durante a soldagem. (a) Soldagem MIG/MAG com penetração total e (b) soldagem MIG/MAG com penetração parcial.	16
Figura 2.7	Representação do calorímetro proposto por Essers e Walter, 1981.	17
Figura 2.8	Calorímetro com fluxo contínuo de água.	18
Figura 2.9	Dispositivo proposto para avaliação do rendimento térmico.	19
Figura 2.10	Princípio operacional do calorímetro.	20
Figura 2.11	Calorímetro de caixa fechada. (a) Detalhe do corpo de prova e localização dos termopares e (b) montagem do bloco na caixa.	21
Figura 2.12	Princípio de avaliação do aporte térmico por massa perdida de N ₂ L com transporte manual do corpo de prova.	22
Figura 2.13	Equipamento calorímetro de nitrogênio líquido.	23
Figura 2.14	Gráfico da eficiência térmica média reportada por autores pelo ano da publicação.	26
Figura 3.1	Desenho dos corpos de prova utilizados nos experimentos (dimensões em mm). (a) Tubo laminado com diâmetro externo de 63,5 mm e (b) tubo laminado com diâmetro externo de 89 mm.	28
Figura 3.2	Calhas utilizadas para isolamento dos corpos de prova. (a) Calha com tubo de PVC e cortiça de menor diâmetro e (b) calha com tubo de PVC e cortiça de maior diâmetro.	30
Figura 3.3	Vista em corte e isométrica das rolhas utilizadas nos experimentos (dimensões em mm). (a) Rolha para os corpos de prova menores e (b) rolha para os corpos de prova maiores.	31
Figura 3.4	Detalhe dos componentes utilizados no sistema de alimentação de água.	32
Figura 3.5	Posicionamento dos termopares no calorímetro.	34
Figura 3.6	Esquema de ligação dos fios de dois termopares para medidas de temperatura diferencial.	34

Figura 3.7	Equipamento ADS2000 IP utilizado na aquisição de dados.	35
Figura 3.8	Sistema utilizado para aquisição de dados: (a) computador e condicionador de sinais; (b) sensor de corrente de soldagem ligado ao cabo da fonte; (c) garra do sinal de tensão conectada à fonte; (d) sensor de velocidade de alimentação do arame posicionado no suporte do rolo de arame e (e) garra de aterramento presa ao cabo terra.	36
Figura 3.9	Fonte utilizada nos processos de soldagem MIG/MAG.	37
Figura 3.10	Alimentador de arame VR 1500 4R/W/E Roboter.	38
Figura 3.11	Equipamentos utilizados: (a) controlador DX 100 e (b) interface homem-máquina na tela de configuração do programa de soldagem.	39
Figura 3.12	Robô MA1400 da Yaskawa Motoman Robotics.	40
Figura 3.13	Manipulador iCAT e tocha de soldagem MIG/MAG instalados no órgão terminal do robô.	40
Figura 3.14	Fonte utilizada nos experimentos com soldagem TIG.	42
Figura 3.15	Módulos do sistema Tartilope v4: (a) manipulador da tocha de soldagem; (b) controlador; (c) interface homem-máquina e (d) controle remoto.	43
Figura 3.16	Representação das juntas do Tartilope v4 no (a) arranjo para soldagem de tubos e (b) arranjo para soldagem de dutos.	44
Figura 3.17	Conjunto Unionmelt AS-800 utilizado na soldagem ao arco submerso.	45
Figura 3.18	Unidade de Controle CAS-100.	46
Figura 3.19	Sistema para monitoramento da vazão de água.	48
Figura 3.20	Imagem de captura de tela do filme gerado durante o monitoramento do sistema em operação. Quadro referente (a) ao nível de água equivalente a 4 litros e (b) ao nível de água equivalente a 5 litros.	49
Figura 3.21	Curvas típicas de tensão e corrente de soldagem para o processo de soldagem GMAW. Em destaque a região utilizada no cálculo da potência instantânea média.	50
Figura 3.22	Curvas típicas de tensão e corrente de soldagem para o processo de soldagem GTAW. Em destaque a região utilizada no cálculo da potência instantânea média.	50
Figura 3.23	Evolução dos sinais de temperatura da água esperada para os ensaios. Em verde é representada a evolução da temperatura da água na entrada do calorímetro, que deve ser constante, em roxo, a temperatura de saída da água e em laranja a subtração dos dois sinais obtida com o uso dos termopares em ligação diferencial.	52
Figura 3.24	Evolução da de temperatura com o tempo (a) antes e (b) após o tratamento de dados proposto.	53

Figura 4.1	Partes constituintes do corpo do calorímetro: (a) tubulação de entrada de água e (b) tubulação de saída de água. Numeração conforme Tabela 4.1.	59
Figura 4.2	Estruturas construídas para apoiar o calorímetro: (a) suportes laterais e suporte central; (b) e (c) apresentam duas das posições reguláveis do suporte central.	60
Figura 4.3	Bancada experimental para os ensaios de calorimetria: (a) vista superior e (b) vista isométrica.	61
Figura 4.4	Possíveis configurações do calorímetro: (a) tubulação de entrada oposta à tubulação de saída; (b) tubulação de entrada em angulo com relação à tubulação de saída e (c) montagem de uma bancada para medição do aporte térmico em chapas metálicas utilizando uma caixa.	62
Figura 4.5	Proposta de caixa para ser utilizada na medição do aporte térmico na soldagem de chapas metálicas.	62
Figura 4.6	Fluxograma das operações que devem ser realizadas antes do início dos experimentos.	63
Figura 4.7	Representação da atividade de número 1.	63
Figura 4.8	Segunda atividade a ser realizada na montagem do calorímetro.	64
Figura 4.9	Montagem das uniões roscáveis (passo 3).	64
Figura 4.10	Representação da montagem das mangueiras (passo 4) e indicação da posição das válvulas de entrada de água (VE) e de regulagem da vazão (VR) do calorímetro.	64
Figura 4.11	Representação da atividade de número 5.	65
Figura 4.12	Representação do calorímetro na posição vertical, com o ponto de entrada de água (PEA) em um nível mais baixo que o ponto de saída de água (PSA).	65
Figura 4.13	Suporte utilizado para manter parte da mangueira de saída de água mais elevada que o corpo de prova.	66
Figura 4.14	Alinhamento da ponta dos sensores de temperatura com o centro da tubulação.	66
Figura 4.15	Termopares fixos ao tampão com o uso de adesivo de silicone.	67
Figura 5.1	Resultados obtidos nos ensaios com o processo GMAW.	68
Figura 5.2	Gráfico de temperatura dos cordões de solda GMAW_01_1 e GMAW_05_1.	72
Figura 5.3	Resultados obtidos nos ensaios com o processo GTAW.	73
Figura 5.4	Gráfico da temperatura obtida para o cordão de solda GTAW_02_3.	74
Figura 5.5	Resultados obtidos nos ensaios com o processo SAW.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Valores de rendimento térmico conforme a EN 1011-1:2009.	10
Tabela 2.2	Valores de eficiência do arco para o processo de soldagem MIG/MAG.	24
Tabela 2.3	Valores de eficiência do arco para o processo de soldagem TIG.	25
Tabela 3.1	Composição química dos corpos de prova conforme os dados do fabricante.	27
Tabela 3.2	Propriedades mecânicas dos corpos de prova conforme os dados do fabricante.	28
Tabela 3.3	Dados técnicos da fonte TransPuls Synergic 4000R.	37
Tabela 3.4	Propriedades nominais do arame AWS ER70S-6.	41
Tabela 3.5	Características constitutivas da fonte Digiplus A7 450.	42
Tabela 3.6	Dados técnicos da fonte de energia V-800.	45
Tabela 3.7	Composição química nominal do metal de adição do processo de soldagem SAW.	47
Tabela 3.8	Composição química nominal do fluxo de soldagem.	47
Tabela 3.9	Experimentos propostos para o processo de soldagem GMAW.	54
Tabela 3.10	Experimentos propostos para o processo de soldagem GTAW.	55
Tabela 3.11	Experimentos propostos para o processo de soldagem SAW.	56
Tabela 3.12	Parâmetros utilizados nos testes preliminares.	57
Tabela 4.1	Lista de materiais utilizados na construção do corpo do calorímetro.	60
Tabela 5.1	Tabela de resultados dos experimentos realizados com o processo de soldagem GMAW.	69
Tabela 5.2	Tabela de resultados dos experimentos realizados com o processo de soldagem GTAW.	74
Tabela 5.3	Experimentos realizados com o processo de soldagem SAW.	77
Tabela 5.4	Tabela de resultados dos experimentos realizados com o processo de soldagem SAW.	78
Tabela 5.5	Erro de leitura dos sensores.	79

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CMT	<i>Cold Metal Transfer</i>
CP	Corpo de Prova
CPVC	Policloreto de Polivinila Clorado
DBCP	Distância Bico de Contato-Peça
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
EN	<i>European Standards</i>
GDL	Graus de Liberdade
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTAW	<i>Gas Shielded Tungsten Arc Welding</i>
IHM	Interface Homem-Máquina
LS&TC	Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
N ₂ L	Nitrogênio Líquido
PEA	Ponto de Entrada de Água
PROMEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PSA	Ponto de Saída de Água
PVC	Policloreto de Polivinila
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SAW	<i>Submerged Arc Welding</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
TP	<i>TeachPedant</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
VE	Válvula de Entrada de Água
VR	Válvula de Regulagem da Vazão de Água

LISTA DE SÍMBOLOS

C_p	Calor específico da água, J/kg·K
E_f	Energia indicada na fonte de soldagem, J
E_s	Energia de soldagem, J/mm
η	Eficiência do processo de soldagem
φ	Difusividade térmica, m ² /s
g	Espessura, m
I	Corrente de soldagem, A
k	Condutividade térmica, W/m·K
K_0	Função de Bessel modificada de segunda espécie e ordem zero
L_a	Distância da ponta do eletrodo à peça, mm
L_c	Comprimento do cordão de solda, mm
\dot{m}	Vazão mássica de água, kg/s
n	Número de pontos amostrados
N	Nível fixo de água no balde, litros
\bar{P}_{inst}	Potência instantânea média, W
P_f	Potência indicada na fonte de soldagem, W
q''	Fluxo de calor, W/m ²
Q_a	Calor aportado a peça, J
Q_{imp}	Aporte térmico por unidade de comprimento do cordão de solda, J/mm
r	Distância radial do ponto à origem da fonte de calor, m
ρ	Densidade, kg/m ³
t_s	Tempo de soldagem, s
U	Tensão de soldagem, V
v_a	Velocidade de alimentação do arame, m/min
v_s	Velocidade de soldagem, mm/s
V_{H_2O}	Vazão de água, litros/s
x	Distância de um ponto à origem, m

1 INTRODUÇÃO

Os processos de soldagem, desde o seu desenvolvimento, vêm ocupando um papel importante entre os processos de fabricação. A indústria automobilística foi uma das responsáveis por um grande crescimento e maior utilização deste processo. No Brasil, as indústrias de base naval, mineração, siderurgia e usinas de açúcar e álcool realizaram grandes investimentos na área de soldagem nos últimos anos.

Devido a sua grande utilização, é necessário um melhor entendimento dos parâmetros envolvidos e a interação entre eles durante o processo de soldagem que tem por característica a complexidade. Com uma maior noção dos fenômenos que ocorrem durante a soldagem é possível obter-se melhores resultados, o que gera um aumento de produtividade e qualidade nos processos de fabricação. Altos investimentos em pesquisa são realizados nesta área, tendo-se como exemplo a parceria firmada entre a Petrobras e o SENAI para implantação do Laboratório Brasileiro de Excelência em Tecnologia de Soldagem, assinada no final de 2011. A estrutura deste laboratório visa atender as necessidades de pesquisa, desenvolvimento e qualificação de processos da área [CIMM, 2013].

O aporte térmico é um fenômeno que ocorre durante os processos de soldagem e ele é de grande importância, isso porque a imposição de calor para a peça está diretamente ligada com as propriedades mecânicas obtidas na junta soldada, bem como com as mudanças metalúrgicas que ocorrem durante o processo. A transferência de calor também está associada com o ciclo térmico de soldagem que impacta diretamente na ocorrência de outros fenômenos como as distorções e tensões residuais na junta soldada [Kumaresan et al., 2011].

Devido à importância do entendimento do aporte térmico nos processos de soldagem, diferentes métodos para sua avaliação, observação e quantificação foram desenvolvidos ao longo dos anos [Arévalo, 2011]. Inicialmente utilizou-se de métodos analíticos que evoluíram para métodos numéricos e experimentais, juntamente com os avanços tecnológicos que permitiram novas abordagens para o problema de transferência de calor na soldagem.

Um dos trabalhos precursores nesta área é o desenvolvido por Rosenthal, 1941. Ele propôs um método analítico para resolução do problema de aporte térmico durante a

soldagem. Seus modelos são válidos para duas e três dimensões, sendo necessário realizar simplificações do problema para resolver as equações desenvolvidas.

Conforme os resultados obtidos com modelos analíticos, o rendimento térmico é um parâmetro ajustável associado às medições experimentais. Por isso, a estimação da eficiência térmica do arco elétrico por meio de métodos analíticos não abrange todos os fatores associados a um fenômeno complexo de fluxo de calor em soldagem, sendo limitado por fatores inerentes ao próprio modelo e propriedades do material que podem afetar a solução do mesmo [Arévalo, 2011].

Os métodos experimentais para avaliar a imposição de calor durante a soldagem e a eficiência térmica se desenvolveram principalmente com o uso de processos calorimétricos. O experimento proposto por Essers e Walter, 1981, foi utilizado para avaliar diferentes processos de soldagem. O aparato construído pelos autores consistia em uma caixa com água na qual foi colocado parcialmente imerso o corpo de prova (CP) a ser soldado e na qual realizaram o monitoramento contínuo da temperatura da água durante a soldagem. Derivados desse modelo foram propostos por outros autores (Lu e Kou, 1989; Bosworth, 1991; Arévalo, 2011).

Outra configuração de calorímetro proposta por autores é baseada no princípio termoelétrico de Seebeck (Giedt et al., 1989; Fuerschbach e Knorovsky, 1991; DuPont e Marder, 1995). Mais recentemente, foram desenvolvidos equipamentos utilizando nitrogênio líquido (N_2L) para avaliação do aporte térmico e eficiência do arco de diferentes processos de soldagem (Kenney et al., 1998; Joseph, 2001; Pépe, 2010; Arévalo, 2011), os quais também apresentaram bons resultados.

Existe uma grande variação nos valores obtidos para a eficiência térmica nos processos de soldagem, tanto entre os métodos analíticos e experimentais como entre os diferentes métodos experimentais. Isso é reflexo da complexidade dos processos e da sua dependência de outros parâmetros durante soldagem. Portanto, não é possível afirmar que existe uma eficiência do arco definida para um dado processo.

Desta forma, esta Dissertação tem como objetivo a construção e a validação de um calorímetro que utiliza um escoamento de água constante para avaliação da eficiência térmica em processos de soldagem a arco elétrico que tenha uma boa relação custo/benefício, adaptável aos diferentes processos, de simples operação e fácil movimentação. Para um melhor entendimento e apreciação desta Dissertação, será apresentado um plano geral de seus capítulos:

- Capítulo 2: Revisão bibliográfica dos temas fundamentais para o desenvolvimento e entendimento dos fenômenos ocorridos no experimento proposto neste trabalho;
- Capítulo 3: Descrição da metodologia, dos materiais e dos equipamentos utilizados no procedimento experimental e na construção do calorímetro;
- Capítulo 4: Explicação sobre o conceito utilizado na construção do calorímetro e do modo de operação do mesmo para realização adequada dos experimentos;
- Capítulo 5: Apresentação dos resultados obtidos com a calorimetria e uma discussão sobre eles;
- Capítulo 6: Resumo do conteúdo de cada um dos Capítulos da Dissertação, com destaque às principais conclusões obtidas no Capítulo 5, projetando perspectivas para futuros trabalhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma pesquisa dos assuntos relacionados com este trabalho nas bibliografias disponíveis se faz necessária para um melhor entendimento do contexto em que ele se encontra e para auxiliar na interpretação dos resultados obtidos, bem como realizar uma comparação com resultados de outros autores.

2.1 Processos de Soldagem

De acordo com Houldcroft, 1979, os processos de soldagem devem preencher os seguintes requisitos:

- Gerar uma quantidade de energia capaz de unir dois materiais ou corpos;
- Remover as contaminações das superfícies a serem unidas;
- Evitar que o ar atmosférico contamine a região durante o processo de soldagem;
- Proporcionar algum grau de controle da microestrutura e, por consequência, das propriedades desejadas da junta soldada.

Grande parte dos processos de soldagem consiste em aquecer a superfície de contato de dois corpos levando-os a um estado de fusão ou plasticidade. A região onde ocorre a fusão dos materiais é denominada junta, que se caracteriza por sua resistência e coesão depois do resfriamento. Dois dos principais processos de soldagem são os processos por pressão e os processos por fusão.

Nos processos de soldagem por fusão, a área a ser soldada é aquecida por uma fonte concentrada de calor, levando à fusão localizada do material, podendo-se adicionar material de preenchimento. Dentre os processos de fusão, podemos citar os processos de soldagem a arco elétrico, que são amplamente utilizados nas indústrias metal-mecânicas.

Um dos maiores problemas na soldagem de metais é a sua rápida reação com o ambiente próximo quando sua temperatura aumenta. O método utilizado para proteger o metal da atmosfera é outra característica que distingue os processos de soldagem. As técnicas variam entre o recobrimento com fluxos, que formam uma escória protetora, a proteção da poça de fusão com gases e, em algumas aplicações, a atmosfera é removida por meio de vácuo.

2.1.1 Soldagem a Arco com Gás de Proteção e Eletrodo Consumível

A soldagem a arco elétrico com gás de proteção e eletrodo consumível (GMAW – *Gas Metal Arc Welding*), também conhecida como MIG/MAG (dos termos em inglês: *MIG – Metal Inert Gas* e *MAG – Metal Active Gas*), tem como princípio básico a formação de um arco elétrico entre a extremidade de um arame-eletrodo consumível alimentado continuamente e o metal a ser soldado. A poça de fusão formada é protegida por um gás, ou a mistura de gases, durante todo o período da soldagem. Esse arranjo pode ser observado na Figura 2.1.

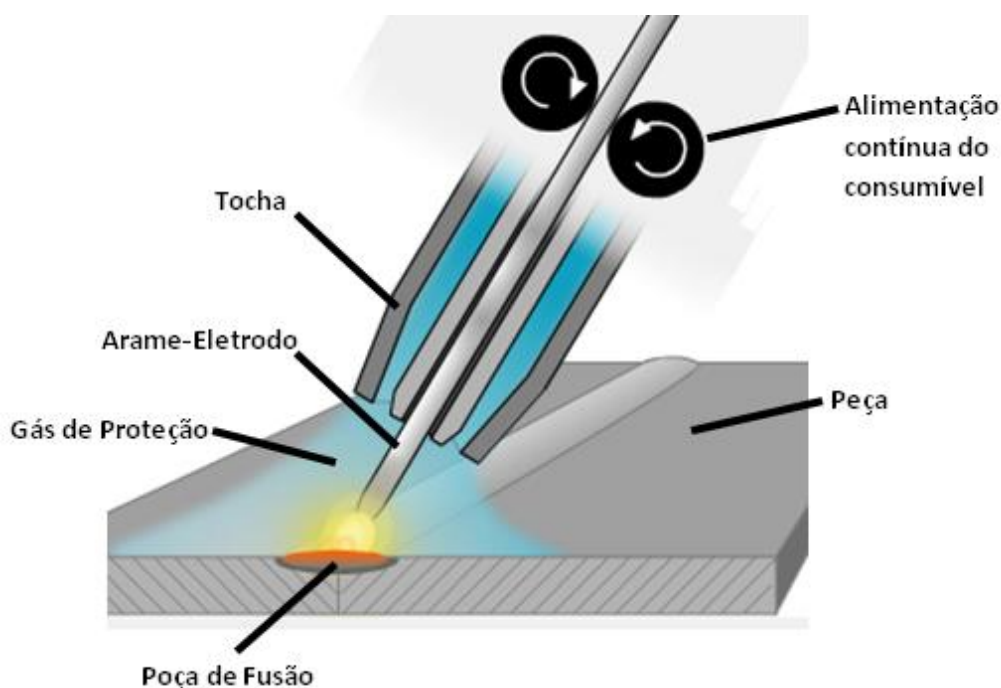


Figura 2.1 – Esquema representativo da soldagem MIG/MAG [Adaptado de ESAB, 2012].

São denominados MIG os processos que utilizam gases inertes, normalmente monoatômicos, como o Argônio (Ar) e o Hélio (He). Estes gases não interagem com o metal da poça de fusão. Já nos processos MAG, a proteção gasosa é feita com um gás dito ativo, ou seja, um gás que interage com a poça de fusão. O dióxido de carbono (CO_2), oxigênio (O_2) e misturas destes gases são muito utilizadas neste tipo de soldagem.

O processo de soldagem GMAW foi desenvolvido no ano de 1948 pelo Battelle Memorial Institute, utilizando o Argônio como gás de proteção na soldagem de

alumínio. Esta proposta oferecia uma alta taxa de deposição de material, mas o alto custo do gás de proteção na época limitava sua aplicação. Em 1953, começou-se a utilizar CO₂ e outras misturas como gás de proteção e então o processo MIG/MAG se tornou viável para soldagem em escala industrial. Desde a sua aceitação, as variantes do processo tem sido investigadas e aprimoradas. Os maiores desenvolvimentos estão principalmente relacionados à transferência metálica no processo de soldagem.

Conforme Machado, 1996, a soldagem pode ser realizada de forma semiautomática ou automática e o processo possui boas características para robotização. Isso se deve ao fato de que é possível soldar em todas as posições, com ótima estabilidade do arco, se os parâmetros do processo forem ajustados adequadamente. Outras características do processo que podemos citar são:

- Não é necessário realizar a remoção de escória;
- Conseguem-se altas taxas de deposição do metal de solda;
- Permite a utilização de altas velocidades de soldagem com menor distorção das peças;
- Juntas com grande abertura são preenchidas facilmente.

2.1.2 Soldagem a Arco com Eletrodo não Consumível e Proteção Gasosa

Soldagem TIG ou GTAW (dos termos em inglês *Tungsten Inert Gas* e *Gas Shielded Tungsten Arc Welding*) é um processo que utiliza um eletrodo de tungstênio puro ou composto com outros metais não consumíveis, 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 os efeitos atmosféricos por um gás inerte, cujo fluxo é direcionado pelo bocal da tocha de soldagem. A Figura 2.2 ilustra esquematicamente o sistema de soldagem TIG.

Embora o seu conceito tenha sido proposto muito tempo antes, apenas em 1941 o processo se desenvolveu e na época ficou também conhecido como processo *Heliarc*, pois na soldagem se utilizava um eletrodo de tungstênio e Hélio como gás de proteção. A afirmação do processo se deu devido à capacidade de realizar-se soldas de alta qualidade em ligas de alumínio, aço inoxidável e magnésio. O processo começou a ser mais utilizado quando passou-se a utilizar o Argônio como gás de proteção no lugar do Hélio, por ser economicamente mais barato.

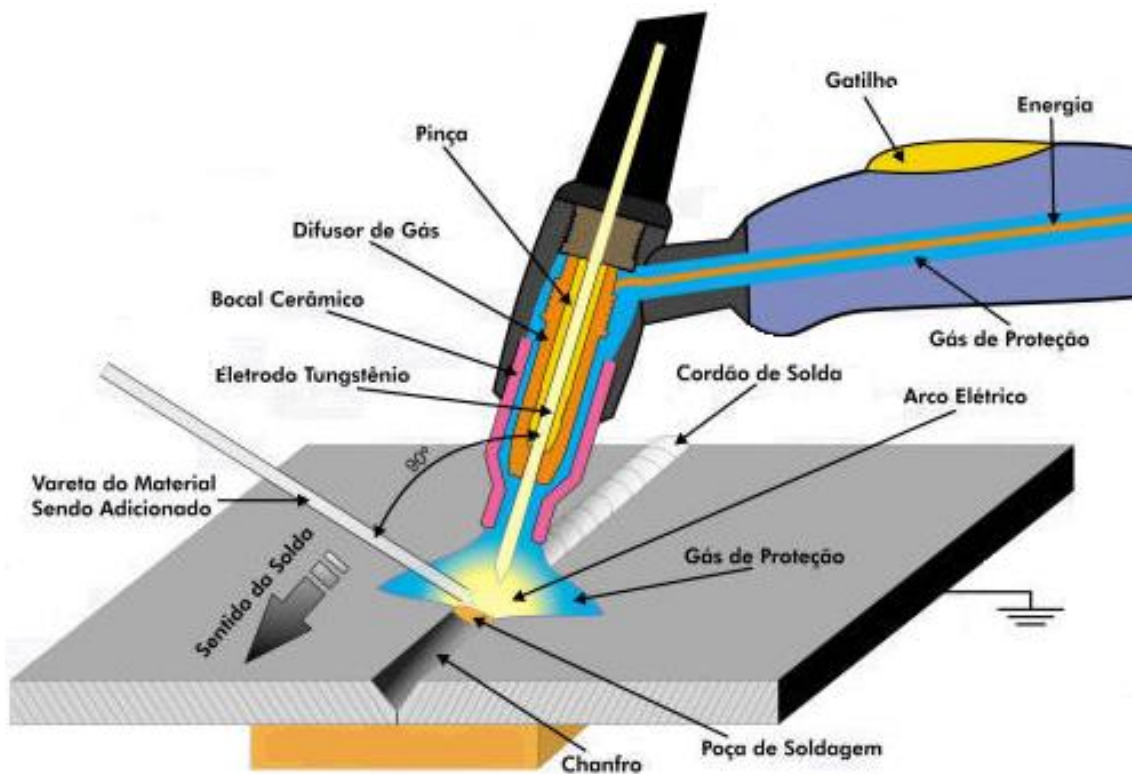


Figura 2.2 – Esquema representativo da soldagem TIG com corte da tocha de soldagem [Adaptado de DCB Oxigênio, 2013].

O modo de operação do TIG é normalmente manual, mas também pode ser semiautomático e automático [Machado, 1996]. A soldagem pode se dar pela simples fusão dos materiais base ou também com a adição de um metal consumível. Neste caso, o procedimento é realizado manualmente pelo soldador com o uso de uma vareta ou automaticamente com um arame proveniente de um alimentador.

A soldagem GTAW produz soldas de grande qualidade, geralmente livres de defeitos, com ótimas propriedades mecânicas e bom acabamento. Sua aplicação se dá em larga escala em indústrias nucleares, químicas, aeronáuticas e de alimentos.

2.1.3 Soldagem ao Arco Submerso

O processo de soldagem ao arco submerso, SAW (do inglês *Submerged Arc Welding*), foi patenteado por Robinoff em 1930 e então vendido para Linde Air Products em 1936 e revolucionou os conceitos de produtividade existentes na época. O arco submerso é um método de soldagem no qual o calor para fundir o metal é gerado

pelo arco que se forma com a passagem de corrente elétrica entre o um arame nu continuamente alimentado e a peça de trabalho (metal base).

Neste processo, a poça de fusão fica protegida por uma camada de material mineral granulado, conhecido como fluxo fusível para soldagem, que possui a função de proteger a poça de contaminações, além de outras funções metalúrgicas. Devido a isto, diferentemente dos processos apresentados anteriormente, o arco elétrico e a poça de fusão, neste caso, não ficam visíveis. O esquema de funcionamento do processo pode ser observado na Figura 2.3.

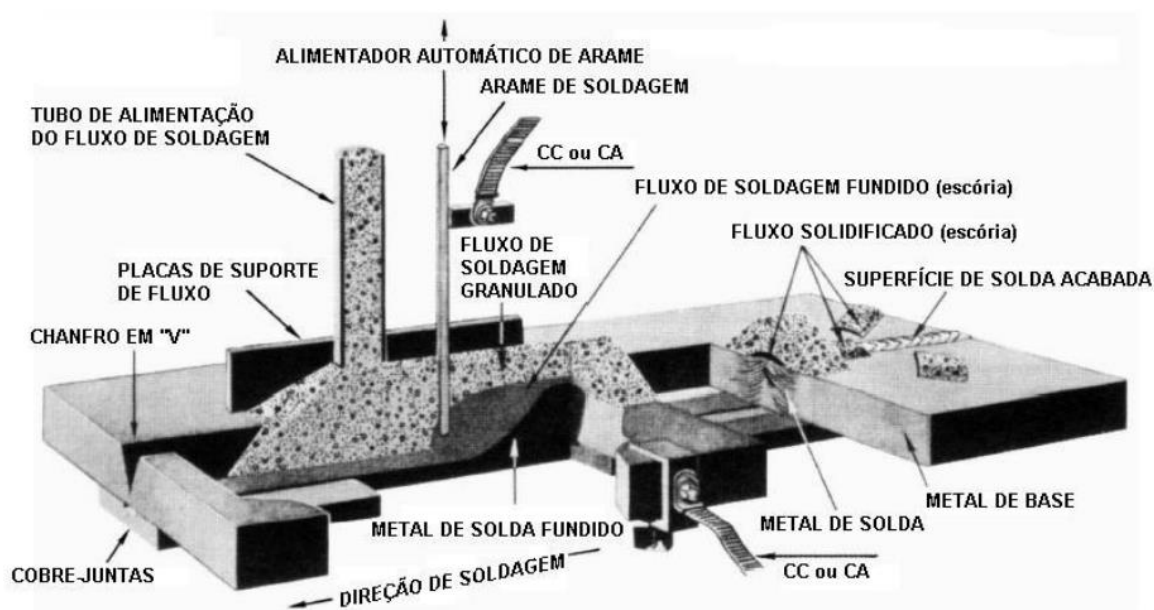


Figura 2.3 – Vista em corte do processo de soldagem ao arco submerso [Fonte: ESAB, 2004].

Este processo apresenta uma alta taxa de deposição, podendo chegar até 20 kg/h com a utilização de apenas um arame, e grande penetração. O modo de operação pode ser automático e, raramente, semiautomático. Apesar de apresentar algumas limitações operacionais, o processo SAW produz um metal de solda com excepcionais características mecânicas e metalúrgicas [Machado, 1996].

2.2 Cálculo da Potência do Arco Elétrico e da Eficiência Térmica

De acordo com Bosworth, 1991, existe uma diferença de até 30% entre os métodos de cálculo para potência elétrica do arco. Gonzalez, 1997, verificou que para o

processo MIG/MAG pulsado, esta diferença aumenta conforme o valor da corrente de excesso e conforme o tempo de bases. Dependendo do processo de soldagem, um método pode ser apropriado, enquanto outro não é recomendado. Joseph, 2001, concluiu que o método da potência instantânea média é o mais adequado.

A pesquisa realizada por Nascimento et al., 2007, verificou diferentes metodologias para o cálculo da energia do arco. Os autores demonstraram pelo teorema da esperança que os métodos mais apropriados são o do cálculo da potência instantânea média e da potência instantânea quadrática média (ou potência instantânea RMS, do inglês *Root Mean Square*), uma vez que estes podem ser utilizados nos casos em que a tensão e a corrente de soldagem são dependentes.

A potência instantânea média \bar{P}_{inst} , em W, pode ser obtida pelo somatório do produto entre a corrente e a tensão em cada instante de tempo, dividido pelo número n de pontos amostrados durante o processo de soldagem:

$$\bar{P}_{inst} = \frac{\sum_{i=1}^n (U_i \cdot I_i)}{n} \quad (2.1)$$

onde U_i e I_i são a tensão de soldagem, em V, e a corrente de soldagem, em A, no ponto amostrado “ i ”, respectivamente.

De posse da potência instantânea média é possível então calcular a energia de soldagem, que é definida tradicionalmente pela razão entre a potência elétrica e a velocidade de deslocamento da tocha ou velocidade de soldagem:

$$E_s = \frac{\bar{P}_{inst}}{v_s} \quad (2.2)$$

onde E_s é a energia de soldagem em J/mm e v_s é a velocidade de soldagem em mm/s.

Nos casos em que se utiliza um controle sobre forma da onda do processo de soldagem e que a fonte mostre diretamente os valores de energia ou potência do processo, as recomendações presentes na ASME *Boiler and Pressure Vessel Code, Section IX: Welding and Brazing Qualifications*, item QW409.1, são para utilizar a Equação 2.3 ou a Equação 2.4 para calcular a energia de soldagem, conforme o apresentado por Melfi, 2010. Ambas as equações resultam no mesmo valor para a

energia de soldagem, sendo aplicadas conforme a informação disponível (energia ou potência).

$$E_s = \frac{E_f}{L_c} \quad (2.3)$$

$$E_s = \frac{P_f \cdot t_s}{L_c} \quad (2.4)$$

onde E_f é a energia indicada na fonte de soldagem em J, L_c é o comprimento do cordão de solda em mm, P_f é a potência indicada na fonte de soldagem em W e t_s é o tempo de soldagem (tempo de arco aberto) em s.

A eficiência térmica do processo η , que também pode ser chamada de eficiência do processo de soldagem, rendimento térmico do processo ou eficiência do arco, é um fator de correção da energia do arco, uma vez que existem perdas durante a soldagem e nem todo calor gerado é entregue à peça. Esta eficiência é obtida pela seguinte relação:

$$\eta = \frac{Q_a}{\bar{P}_{inst} \cdot t_s} \quad (2.5)$$

onde Q_a é o calor aportado à peça em J.

Algumas normas apresentam valores tabelados para a eficiência térmica de alguns processos de soldagem, porém sabe-se que estes valores não são consistentes uma vez que não consideram parâmetros ajustáveis dos processos de soldagem, como a velocidade de alimentação do arame e a vazão do gás de proteção. A Norma Europeia DIN EN 1011-1:2009 apresenta valores de rendimento térmico constantes para os processos de soldagem GTAW, GMAW e plasma, conforme o apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Valores de rendimento térmico conforme a DIN EN 1011-1:2009.

Processo	η
GTAW	60%
GMAW	80%
Plasma	60%

2.3 Mecanismos de Transferência de Calor

O calor é definido como a energia térmica em trânsito devido a diferença de temperaturas no espaço [Incropera et al., 2008], ou seja, sempre que existir uma diferença de temperatura em um corpo ou entre corpos de um sistema, haverá um fluxo de calor. No momento em que existe equilíbrio entre os corpos e eles se encontram no mesmo nível energético, essa transferência é cessada.

A transferência de calor por condução ocorre quando temos um meio estacionário sujeito a um gradiente de temperatura e a transferência se dá por este corpo. A condução também pode ser entendida como a transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas por interações entre as partículas dos materiais. Este mecanismo de transferência de calor é diretamente proporcional à condutividade térmica do corpo.

A convecção está associada à transferência de energia que se dá entre um fluido em movimento e uma superfície, quando eles se encontram em temperaturas diferentes. Ela é classificada em convecção forçada, quando o escoamento é advindo de meios externos, e de convecção natural (ou livre), quando o escoamento do fluido é induzido por forças de arraste, originadas pela diferença de temperatura. Esse modo de transferência de calor é mais complexo, pois além de depender das propriedades do fluido (densidade, condutividade térmica, calor específico, viscosidade), é função da geometria da superfície e das condições de escoamento.

Outro mecanismo de transferência de calor é a radiação térmica. Ela ocorre continuamente, uma vez que todos os meios que não estão em uma temperatura nula emitem energia na forma de ondas eletromagnéticas. Enquanto a transferência de energia por condução ou convecção requer a presença de um meio material, a radiação não necessita dele, até sendo mais eficiente no vácuo. Uma representação dos modos de transferência de calor podem ser visualizados no esquema apresentado na Figura 2.4.

Além da condutividade térmica, outro conceito importante a ser observado quando a transferência de calor se dá por condução, é o da difusividade térmica. Obtida pela relação entre a condutividade térmica e a capacidade calorífica volumétrica (produto entre a densidade e o calor específico do material), ela é uma propriedade do material que controla o processo de transferência de calor por condução em regime transiente e está relacionada com a capacidade que o material tem de conduzir calor em

relação à sua capacidade de armazená-lo. Portanto, materiais que possuem alta difusividade térmica atingem uma nova condição de equilíbrio mais rapidamente quando sujeitos a uma mudança de temperatura do que aqueles que possuem uma baixa difusividade térmica.

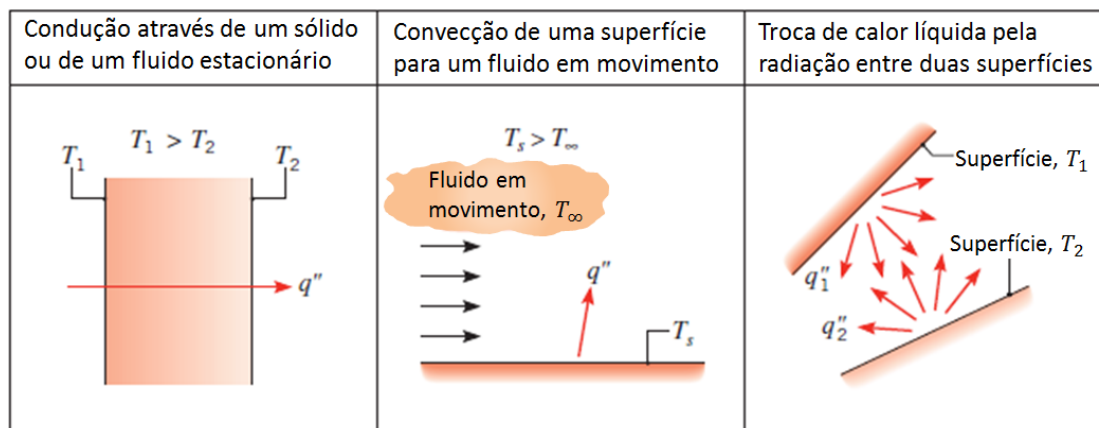


Figura 2.4 – Representação dos mecanismos de transferência de calor por condução, convecção e radiação [Adaptado de: Incropera et al., 2008].

2.4 Modelos de Transferência de Calor na Soldagem

O aporte térmico que ocorre durante o processo de soldagem tem sido estudado por diferentes pesquisadores. Os autores dessas pesquisas sugerem, de uma forma geral, que a energia do arco e a transferência de calor para peça são dois fatores de grande importância para um melhor entendimento dos processos de soldagem a arco elétrico, uma vez que estes estão diretamente relacionados com as transformações físicas do metal base que ocorrem durante os processos. A imposição de calor no material pode causar variações dimensionais e alterações microestruturais localizadas no material, podendo resultar em efeitos indesejados como a mudança nas propriedades mecânicas, químicas, físicas, distorções, tensões residuais e a formação de trincas [Arévalo, 2011].

Um dos primeiros estudos que abordou a transferência de calor no processo de soldagem a arco foi realizado por Rosenthal, 1941. Ele desenvolveu um modelo teórico utilizando as seguintes simplificações e considerações:

- As propriedades físicas do material base se mantêm constantes durante o processo de soldagem;
- A fonte de calor é considerada pontual;

- Não ocorre troca de calor por convecção na poça de fusão;
- O fluxo de calor em uma peça com comprimento supostamente infinito é considerado estacionário ou quase-estacionário;
- Perdas de calor para atmosfera são desconsideradas;
- O calor proveniente do metal de adição não é levado em conta nos cálculos.

Com isso, Rosenthal, 1941, obteve a equação que descreve o fluxo de calor para duas dimensões durante a soldagem de placas finas, com largura considerada infinita para uma fonte de calor pontual Q_f , em J, que se move com uma velocidade v , em m/s:

$$T - T_0 = \frac{Q_f}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot g} \exp(-\varphi \cdot v \cdot x) K_0(\varphi \cdot v \cdot r) \quad (2.6)$$

onde T é a temperatura do ponto e T_0 a temperatura inicial, ambas em K, k é a condutividade térmica do corpo de prova em W/m·K, g é a espessura do corpo de prova em m, φ é a difusividade térmica do corpo de prova em m²/s, x é a distância do ponto à origem ao longo do eixo cartesiano x em m, K_0 é a função de Bessel modificada de segunda espécie e ordem zero e r é a distancia radial do ponto à origem da fonte de calor em m.

Nunes, 1983, fez novas considerações aos modelos analíticos de Rosenthal, 1941. O autor considerou a ocorrência de troca de fases e a troca de calor por convecção na poça de fusão. Apesar deste novo modelo, mais complexo, ter aumentado o entendimento do aporte térmico durante o processo de soldagem, era limitado para soldagens sem deslocamento relativo entre a tocha e a peça.

Um dos primeiros modelos implementados computacionalmente foi desenvolvido por Kou e Le, 1984. Utilizado para estudar o fluxo de calor na soldagem GTAW de tubos, o modelo para três dimensões e estático apresentou resultados de ciclos térmicos e de região de fusão muito próximos aos obtidos experimentalmente. Já os resultados obtidos com o modelo transiente não foram tão precisos quanto os anteriores, quando comparados com os resultados obtidos com experimentos.

Gonçalves et al., 2006, usaram de técnicas inversas para estimar a fonte de calor, eficiência térmica e eficiência de fusão para um processo de soldagem TIG. O modelo proposto pelos autores leva em consideração a troca de fases, perdas de calor e a variação das propriedades físicas do material com a temperatura. Com essas

considerações foi possível identificar o rendimento do processo e a eficiência de fusão a cada instante da soldagem.

Mais recentemente, Scotti et al., 2012, propuseram um modelo descritivo mais abrangente para melhor entender os efeitos do fluxo de calor nos processos soldagem. Ele foi dividido em duas partes: a primeira considerando o balanço de energia no arco elétrico e a segunda descrevendo o fluxo de calor no metal base. Com o uso dos modelos desenvolvidos, eles verificaram a imprecisão das simplificações realizadas nos modelos analíticos. No estudo, os autores também propõe o uso do termo “*calor imposto efetivo*”, o qual está relacionado com o calor imposto que realmente afeta a velocidade de resfriamento nas regiões aquecidas do metal base. Este termo seria uma maneira mais adequada de se correlacionar a energia de soldagem com as transformações metalúrgicas que ocorrem durante os processos de soldagem. Conforme o proposto por Scotti et al., 2012, para o mesmo calor imposto obtido através de experimentos com calorimetria, o calor imposto efetivo pode ser diferente.

2.5 Perdas de Calor Durante o Processo de Soldagem

Sabe-se que apenas uma parte da energia gerada pelo arco elétrico é absorvida pela peça durante a soldagem. As perdas de calor se dão pela ação dos mecanismos de convecção, condução e radiação, bem como pela geração de vapor metálico e respingos. A tarefa de quantificar a energia perdida em um processo físico complexo como o arco elétrico é difícil, porém não é recomendado negligenciar estas perdas ou então utilizar valores estimados para elas. Dados de pesquisas experimentais mostram que o mecanismo de transferência de calor por condução é aquele que mais representa a energia real imposta à peça durante a soldagem a arco elétrico [Pépe, 2010].

Segundo DuPont e Marder, 1995, a maior parte da energia total gerada pelo processo é fornecida pelo arco elétrico e apenas uma pequena parte é fornecida pelo eletrodo. A energia total (energia do eletrodo somada a energia do arco elétrico) é transmitida em parte para a peça, enquanto o restante perde-se para o ambiente. Os autores verificaram que estas perdas energéticas representam aproximadamente 1% da potência total do arco. Do calor que é entregue para a peça, uma parte é responsável pela fusão do metal base e a outra é transmitida por condução pelo metal base, aumentando a sua temperatura. Um esquema da distribuição de energia que ocorre no

processo de soldagem a arco proposto por DuPont e Marder, 1995, pode ser observado na Figura 2.5.

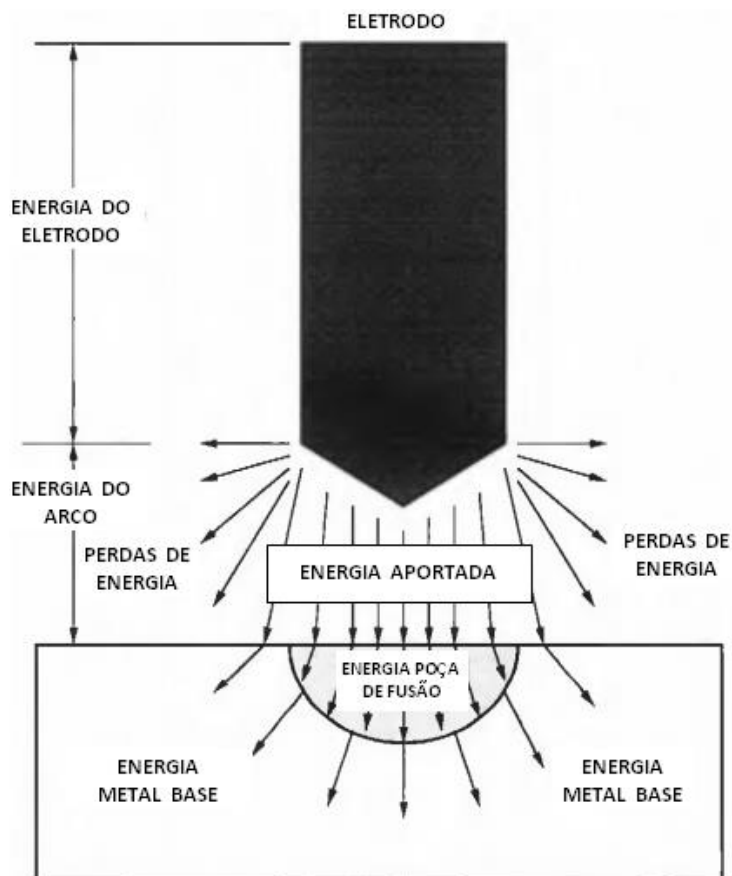


Figura 2.5 – Desenho ilustrativo da distribuição de energia em um processo de soldagem a arco elétrico [Adaptado de DuPont e Marder, 1995].

Estes autores também realizaram a análise da perda de calor devido ao aquecimento do eletrodo. Eles verificaram que nos processos de soldagem em que o eletrodo é consumível (GMAW e SAW) o calor gerado pelo aquecimento resistivo do arame-eletrodo é transferido em parte para a peça pela fusão dele, enquanto nos processos em que o eletrodo não é consumível (GTAW), esta energia é perdida pelo aquecimento do eletrodo e da tocha de soldagem, que são resfriados continuamente com água.

Comparando as energias impostas ao metal base e os rendimentos térmicos em um processo de soldagem MIG/MAG em passes de solda com penetração total e penetração parcial, Quintino et al., 2013, observaram uma redução na energia aportada ao corpo de prova para os passes realizados com penetração total. As perdas de calor,

que variaram entre 3% e 12%, estão relacionadas com a perda por radiação térmica pelo lado da raiz do cordão de solda. Um esquema proposto pelos autores para o fluxo de calor na peça durante a soldagem GMAW pode ser visualizado na Figura 2.6. As setas apresentadas na imagem com número 1 representam as perdas de calor por convecção natural, as identificadas com o número 2 referem-se ao calor perdido por radiação e o número 3 representa a difusão de calor pela peça por meio do mecanismo de condução térmica.

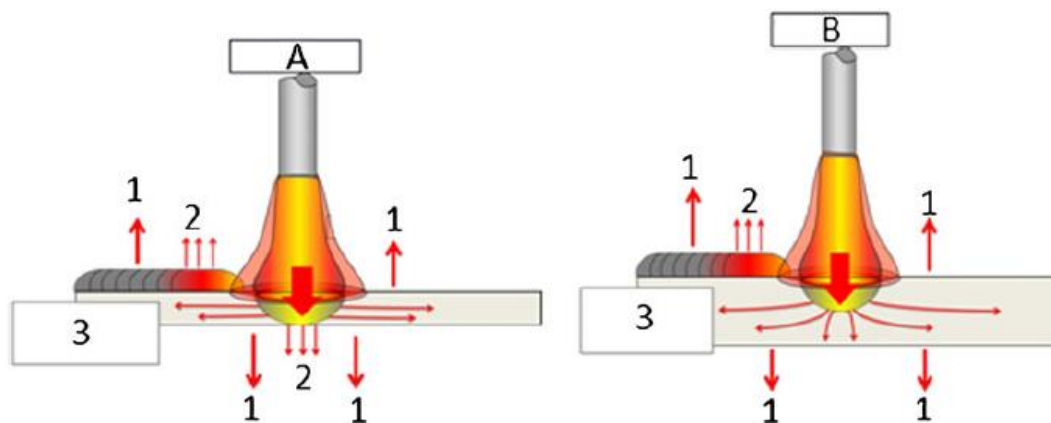


Figura 2.6 – Transferência de calor na peça durante a soldagem. (a) Soldagem MIG/MAG com penetração total e (b) soldagem MIG/MAG com penetração parcial

[Fonte: Quintino et al., 2013].

As perdas entre a energia de soldagem e o calor aportado não são dependentes somente do processo de soldagem, mas dos parâmetros do processo e de características do material base, o que não permite o uso de um único valor de rendimento térmico para um dado processo como valor absoluto [Scotti et al., 2012].

2.6 Calorimetria

O ato de medir a troca de energia que se dá em forma de calor entre corpos ou sistemas é chamado de calorimetria. Com as medidas calorimétricas é possível determinar a condutividade térmica ou capacidade calorífica de materiais. Os calorímetros são os equipamentos utilizados nestas medições e a sua concepção e construção podem ser de diversas formas.

A calorimetria é utilizada para auxiliar no entendimento do ciclo térmico, da transferência de calor e na quantificação da eficiência térmica dos processos de soldagem. Os resultados obtidos com este método experimental têm se mostrado satisfatórios, uma vez que envolvem as principais variáveis do processo de soldagem e os métodos numéricos e analíticos são muito limitados ao modelo utilizado e às aproximações realizadas.

Um dos mais difundidos calorímetros que foi utilizado para avaliação do rendimento do arco em processos de soldagem tem como princípio básico o resfriamento contínuo do corpo de prova com água. Essers e Walter, 1981, mantiveram uma chapa de aço parcialmente imersa na água, deixando apenas a face onde seria realizada a soldagem exposta ao ambiente. A água era continuamente misturada por um agitador para garantir a homogeneização da temperatura no interior do calorímetro, que foi monitorada durante todo o processo, e atingiu um valor máximo de 35 °C. Os autores verificaram uma perda de calor pela superfície exposta do corpo de prova menor que 5%, uma eficiência térmica média de 65% para o processo MIG/MAG-Plasma e de 71% para o processo MIG/MAG convencional. Um esquema representativo do calorímetro utilizado pelos pesquisadores pode ser observado na Figura 2.7.

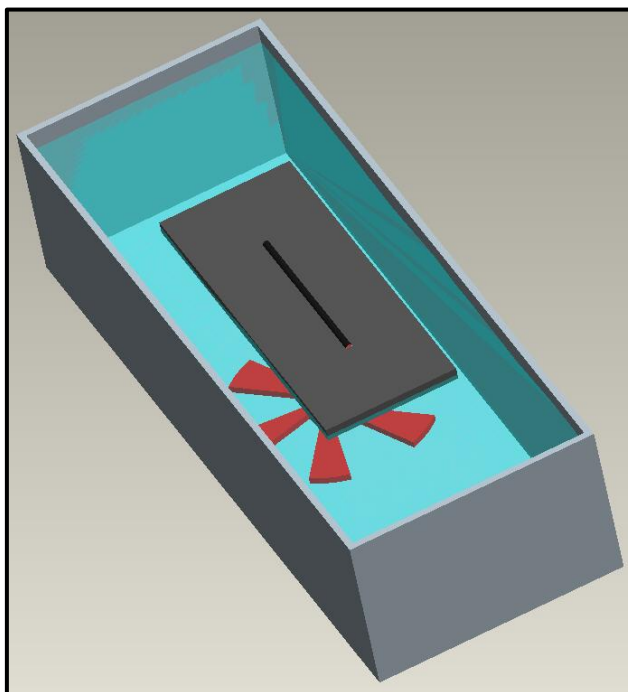


Figura 2.7 – Representação do calorímetro proposto por Essers e Walter, 1981.

Lu e Kou, 1989, diferentemente dos autores anteriores, construíram um calorímetro com escoamento contínuo de água, medindo a sua temperatura na entrada e na saída do equipamento com a utilização de termopares. Este fluxo ficava em contato com a face oposta à solda no corpo de prova, que foi montado no topo de uma caixa de aço inoxidável. Na Figura 2.8 é possível visualizar o calorímetro proposto pelos autores. Os pesquisadores verificaram que não ocorreu a formação de bolhas resultantes da vaporização da água com este arranjo e obtiveram uma eficiência térmica média de 80% na soldagem MIG/MAG de alumínio com transferência metálica globular. Os autores determinaram que 45% do calor é proveniente do arco elétrico, 23% das gotas formadas pela fusão do arame-eletrodo e 12% da poça de fusão. A eficiência térmica obtida foi significativamente maior que a reportada anteriormente por Essers e Walter, 1981. Essa diferença foi atribuída às propriedades do material base utilizado no teste, que neste caso era alumínio.

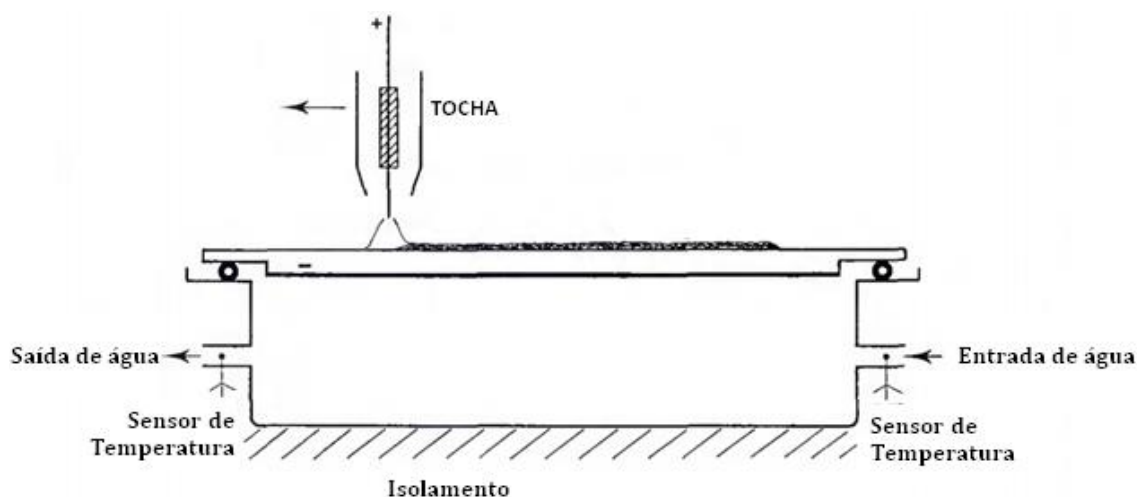


Figura 2.8 – Calorímetro com fluxo contínuo de água [Adaptado de Lu e Kou, 1989].

O calorímetro proposto por Bossworth, 1991, é composto por um recipiente isolado do ambiente externo, preenchido com água e instrumentado com termopares para monitoramento da temperatura interna. Para verificação do calor aportado ao corpo de prova durante a soldagem, o autor padronizou os tempos de soldagem e de intervalo entre o término da solda e a imersão do corpo de prova no recipiente com água. Devido a incertezas e à perda de calor durante a transferência da chapa metálica soldada, foi atribuída uma incerteza total de 5% no cálculo da eficiência térmica. Mantendo os parâmetros de soldagem constantes, o autor observou que uma quantidade maior de

calor é entregue ao corpo de prova se utilizado o processo de soldagem MIG/MAG não pulsado, quando comparado ao processo MIG/MAG pulsado, exceto quando a transferência metálica se dá por curto-circuito. Bosworth, 1991, também verificou que o parâmetro de soldagem que tem maior impacto na eficiência térmica do processo é a velocidade de alimentação do arame. Neste estudo foi obtida uma eficiência térmica de 83% a 85% para o processo de soldagem MIG/MAG convencional e na faixa de 82% a 83% para o processo MIG/MAG pulsado.

Com uma proposta de calorímetro que também utiliza água, mas diferente dos autores apresentados anteriormente, o aparato desenvolvido por Haelsig et al., 2011, consiste em uma placa metálica mantida angulada em relação a um recipiente termicamente isolado. A tocha de soldagem se desloca paralelamente à chapa com uma velocidade constante e concomitantemente com este deslocamento, o nível de água vai sendo elevado. Com isso, tem-se uma situação em que logo após que a realização da soldagem, o cordão gerado é encoberto com água. A temperatura da água é monitorada por termopares, além de recircular pelo reservatório por meio de uma bomba. O calorímetro proposto por Haelsig et al., 2011 pode ser observado na Figura 2.9.

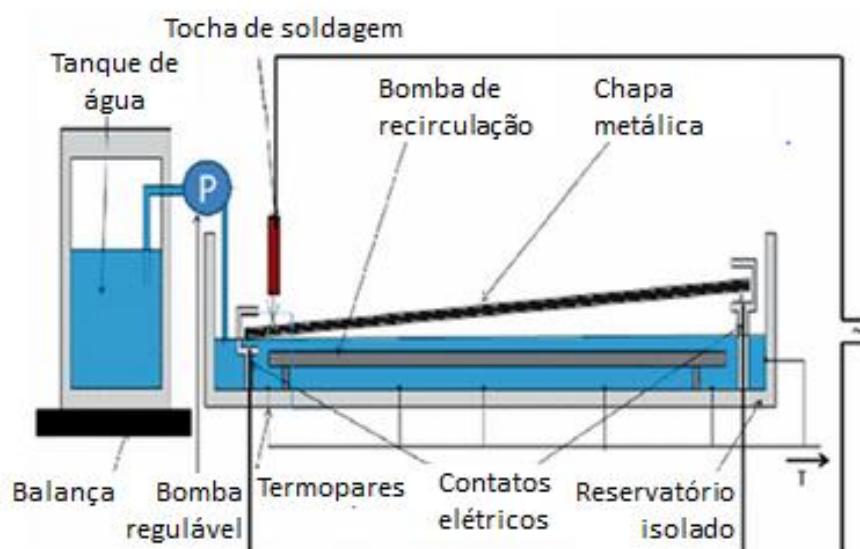


Figura 2.9 – Dispositivo proposto para avaliação do rendimento térmico [Adaptado de Haelsig et al., 2011].

DuPont e Marder, 1995, utilizaram um calorímetro baseado no princípio termoelétrico de Seebeck semelhante ao desenvolvido por Giedt et al., 1989, conforme pode ser observado na Figura 2.10. O aparato consiste em uma junção termocondutora

que fica sujeita a um gradiente de temperatura. Um lado da junção é constantemente resfriado com água, enquanto o outro lado fica em contato direto com o corpo de prova a ser soldado. Este gradiente de temperatura é medido com um par de termopares, sendo cada um posicionado em um dos lados da junção. O sinal de tensão elétrica obtido é multiplicado por uma constante de calibração (função da condutividade térmica específica, espessura da junção condutora e do tipo de termopar utilizado), fornecendo o valor de energia que é entregue à peça durante o processo de soldagem. Os autores obtiveram uma eficiência térmica média de 67% para o processo de soldagem TIG e de 84% para os processos MIG/MAG e arco submerso. Estes valores concordaram com os obtidos no estudo de Giedt et al., 1989.

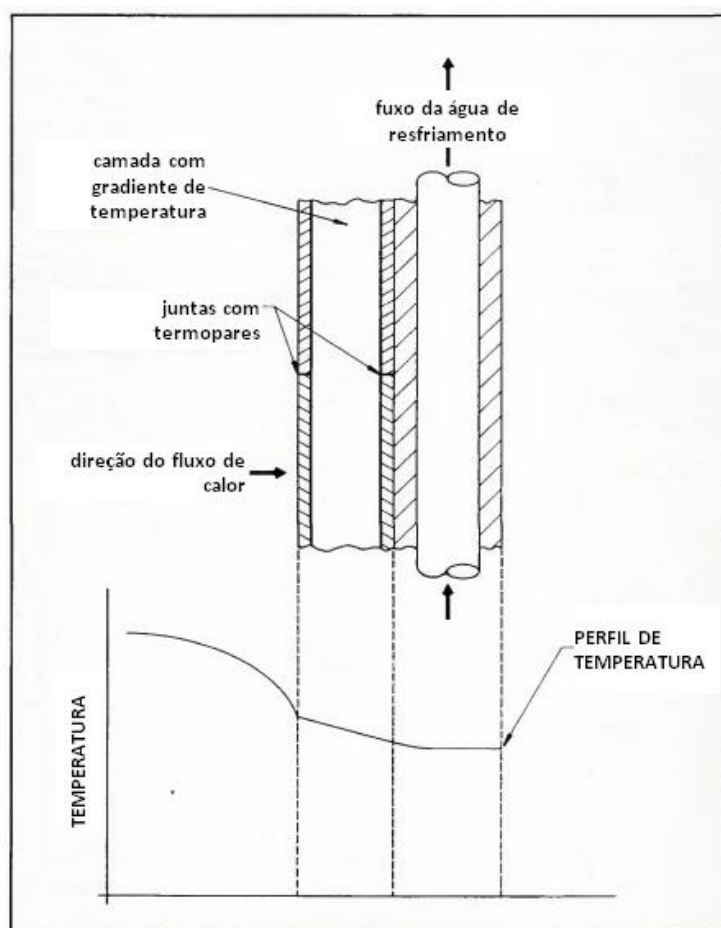


Figura 2.10 – Princípio operacional do calorímetro [Adaptado de DuPont e Marder, 1995].

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

autores também verificaram que o processo plasma teve a menor eficiência térmica, bem como apresentou a maior oscilação entre os resultados; os valores de rendimento do processo variaram entre 50% e 75%. Em um estudo mais recente, Fuerschbach, 1996, encontrou uma eficiência térmica entre 20% e 90% para soldagem a laser, sendo esta variação diretamente dependente da intensidade do feixe laser.

Utilizando um calorímetro de caixa fechada, Cantin e Francis, 2005, investigaram a eficiência térmica na soldagem MIG/MAG em alumínio. O equipamento utilizado consiste em uma caixa com uma base de cerâmica sobre a qual foi apoiado o bloco de alumínio a ser soldado. O espaço restante da caixa foi preenchido com vermiculita, visando reduzir a perda de calor para o ambiente vizinho. Foram posicionados oito termopares no bloco de alumínio para monitoramento do perfil de temperatura durante a soldagem. O esquema de montagem do calorímetro pode ser observado na Figura 2.11.

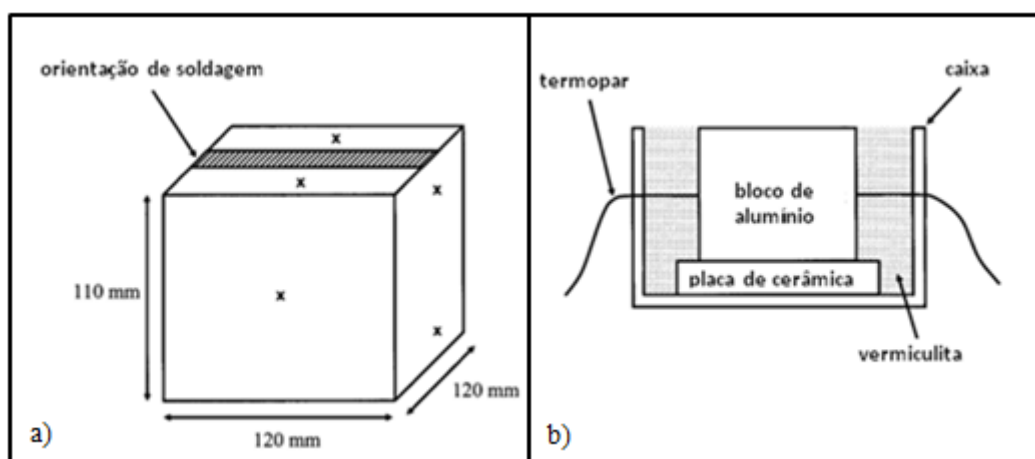


Figura 2.11 – Calorímetro de caixa fechada. (a) Detalhe do corpo de prova e localização dos termopares e (b) montagem do bloco na caixa [Adaptado de Cantin e Francis, 2005].

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

Em pesquisas mais recentes, diferentes autores (Kenney et al., 1998; Joseph, 2001; Pépe, 2010; Arévalo, 2011) utilizaram calorímetros com nitrogênio líquido para verificação do aporte térmico em processos de soldagem. Estes equipamentos apresentaram um baixo erro e boa repetitividade nos ensaios. Em contrapartida, tem-se um custo mais elevado que os calorímetros que utilizam água ou que são baseados no efeito de Seebeck.

Kenney et al., 1998, utilizaram um recipiente de Dewar e uma balança eletrônica conectada a um computador, com o qual eles monitoravam a perda de peso associada à vaporização do nitrogênio líquido. Após a soldagem ser realizada, o corpo de prova era rapidamente inserido manualmente dentro do recipiente de Dewar, conforme os passos que podem ser observados na Figura 2.12. Os autores obtiveram eficiências térmicas entre 69% e 82% para o processo de soldagem MIG/MAG pulsado. Utilizando o mesmo princípio, porém monitorando a balança com a utilização de um circuito de câmera de filmagem, Pépe, 2010, obteve valores de rendimento do arco para o processo de soldagem MIG/MAG CMT (do inglês *Cold Metal Transfer*) que variaram de 80% até 93%.



Figura 2.12 – Princípio de avaliação do aporte térmico por massa perdida de N_2L com transporte manual do corpo de prova [Fonte: Arévalo et al., 2011].

Arévalo, 2011, construiu um equipamento automatizado visando eliminar a intervenção do operador de forma direta, como no transporte da chapa soldada entre o ponto de realização do cordão até o calorímetro e também padronizar a medição da massa evaporada de N_2L . O equipamento é dotado de um sistema pneumático para fixação e manipulação do corpo de prova a ser soldado, de um sistema para deslocamento da tocha de soldagem e de um sistema para a aquisição de dados do

processo de soldagem e da massa evaporada de nitrogênio líquido, conforme pode ser observado na Figura 2.13.



Figura 2.13 – Equipamento calorímetro de nitrogênio líquido [Fonte: Arévalo, 2011].

O autor verificou que a bancada experimental com o calorímetro de N_2L apresentou boa repetitividade, com uma diferença máxima de 3% entre os resultados. Foi obtida uma eficiência térmica média de 78,6% para o processo MIG/MAG curto-circuito convencional, 73,6% para MIG/MAG com transferência metálica goticular e 76,1% para o processo MIG/MAG com curto-circuito controlado.

Utilizando-se dos princípios da calorimetria, porém sem analisar a eficiência térmica, Soderstrom et al., 2011, construíram um dispositivo para avaliar o calor resultante do metal de adição fundido em um processo de soldagem GMAW. Os autores observaram que o calor que é transferido pelas gotas do eletrodo para a poça de fusão varia entre 20% e 30% da energia total de soldagem. Eles também verificaram que na transição do modo de transferência metálica globular para spray ocorreu uma redução significativa na temperatura da gota metálica, bem como no calor armazenado e transportado pela mesma.

2.7 Valores de Eficiência Térmica Obtidas em Estudos Anteriores

Para serem utilizados como referência para as atividades experimentais desenvolvidas neste trabalho, foi realizado um levantamento dos valores de rendimento

térmico que foram obtidos por outros autores. Os resultados atingidos pelos diferentes estudos são apresentados nas Tabelas 2.2 e 2.3. Na Tabela 2.2 encontram-se as eficiências térmicas obtidas para os processos de soldagem GMAW e na Tabela 2.3 para os processos GTAW. Em ambos os casos, os dados estão categorizados conforme as características construtivas do calorímetro e os parâmetros de soldagem. Nas tabelas, o símbolo L_a se refere à distância da ponta do eletrodo à peça em mm e o símbolo v_a à velocidade de alimentação do arame em m/min.

Tabela 2.2 – Valores de eficiência do arco para o processo de soldagem MIG/MAG.

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

Tabela 2.3 – Valores de eficiência do arco para o processo de soldagem TIG.

Autor(es) e princípio do calorímetro	Gás de Proteção	Polaridade do Eletrodo	<i>U</i> [V]	<i>I</i> [A]	<i>L_a</i> [mm]	<i>v_s</i> [mm/s]	<i>η</i>
Arévalo, 2011 Fluxo de água contínuo	100% Ar	Negativo	10,5	100	3	3,3	69%
	100% Ar	Negativo	12,9	150	5	2,5	59%
Giedt et al., 1989 Princípio de Seebeck	100% Ar	Negativo	9,7	100	3	0,8	82%
	100% Ar	Negativo	8,8	155	3	0,8	84%
	100% Ar	Negativo	10,3	200	3	0,8	82%
Fuerschbach e Knorovsky, 1991 Princípio de Seebeck	100% Ar	Negativo	-	29	1	4,2	75%
	100% Ar	Negativo	-	132	1	21,2	80%
	100% Ar	Pulsado	-	42	1	6,3	80%
DuPont e Marder, 1995 Princípio de Seebeck	100% Ar	Negativo	15	250	6	7	67%
	100% Ar	Negativo	16	350	6	7	70%
Cantin e Francis, 2005 Calorímetro de caixa fechada	100% Ar	Negativo	11,1	100	2	1,67	80%
	100% Ar	Negativo	12	200	4	1,67	76%
	100% He	Negativo	18	200	4	1,67	87%
	100% Ar	Positivo	16,1	100	2	1,67	58%
	100% Ar	Positivo	17	100	4	1,67	55%
	100% He	Positivo	23,8	100	2	1,67	58%
Arévalo, 2011 Imersão do corpo de prova em recipiente Dewar com N ₂ L	100% Ar	Negativo	11	100	3	2,5	72%
	100% Ar	Negativo	11	102	3	3,3	74%
	100% Ar	Negativo	12	150	5	2,5	61%
	100% Ar	Negativo	11,7	150	5	4,2	69%

Conforme pode ser observado nas Tabelas 2.2 e 2.3, a eficiência obtida nos diferentes experimentos varia significativamente. Stenbacka et al., 2012, realizaram um levantamento dos resultados obtidos por diferentes autores com calorimetria e simulação numérica para a eficiência do arco em processos de soldagem GTAW. Na Figura 2.14 pode-se observar a compilação resultante da pesquisa que os autores realizaram. Os dados foram apresentados conforme o ano de publicação e é possível visualizar que existe uma grande dispersão entre os resultados, não sendo possível observar qualquer tipo de relação entre eles.

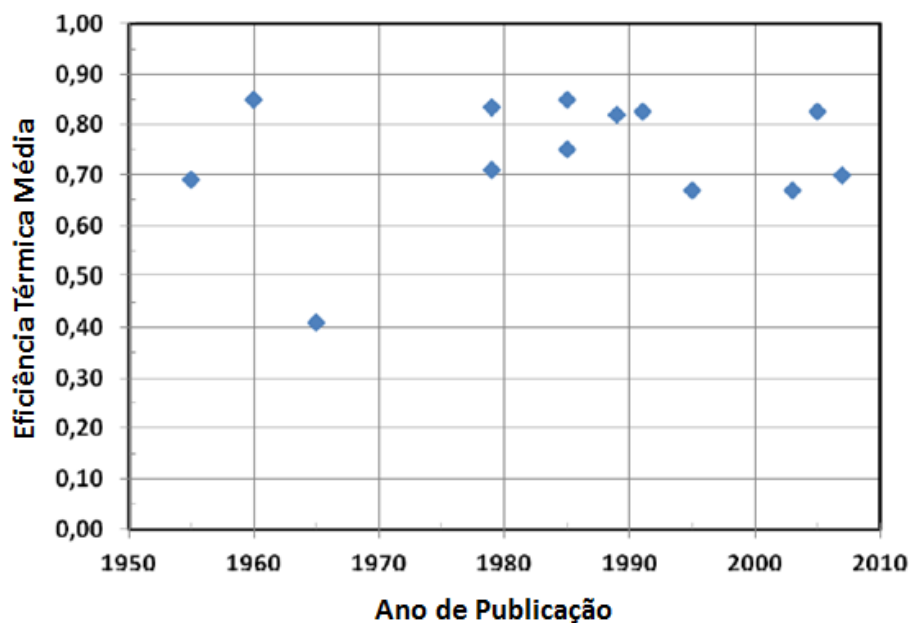


Figura 2.14 – Gráfico da eficiência térmica média reportada por autores pelo ano da publicação [Fonte: Stenbacka et al., 2012].

Para o processo de soldagem ao arco submerso existem poucos estudos publicados que avaliaram a eficiência térmica do processo. DuPont e Marder, 1995, verificaram uma eficiência variando entre 83% e 90%, para uma tensão de soldagem entre 34 V e 37 V e uma corrente de 200 A a 320 A. Os autores realizaram a soldagem com uma velocidade de deslocamento de 15 mm/s e uma velocidade de alimentação do arame consumível de 7,2 m/min.

Fuerschbach, 2004, consolidou dados reportados por alguns estudos para eficiência térmica de diferentes processos de soldagem, realizando uma recomendação de valores a serem utilizados na realização de simulações e cálculos para cada um dos processos. Para o processo de soldagem SAW ele relatou que as pesquisas apontam para uma eficiência média do arco de 90% e recomendou a utilização deste valor como referência para esse processo.

3 MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS

No decorrer deste capítulo é apresentado o planejamento desenvolvido para realização dos experimentos. Também são descritos os materiais e equipamentos que foram utilizados na construção do calorímetro e durante os processos experimentais.

As atividades experimentais foram desenvolvidas no Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas (LS&TC) no Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

3.1 Corpos de Prova

Para realização dos experimentos de soldagem e avaliação do seu rendimento térmico, foram utilizados tubos mecânicos laminados sem costura, que atendem à norma DIN 2391 St-52, com diâmetros externos de 63,5 mm e 89 mm e diâmetros internos de 48,5 mm e 55,5 mm, respectivamente. O comprimento dos tubos foi padronizado em 200 mm, conforme pode ser observado na Figura 3.1. A composição química e as propriedades mecânicas dos corpos de prova são apresentadas na Tabela 3.1 e na Tabela 3.2 (dados fornecidos pelo fabricante). Optou-se por utilizar estes tubos por serem facilmente encontrados no comércio e por apresentarem boa soldabilidade.

Tabela 3.1 – Composição química dos corpos de prova conforme os dados do fabricante.

Composição Química, % (aprox.)	
C	0,2
Si	0,3
Mn	1,4
P	< 0,03
S	< 0,03

Tabela 3.2 – Propriedades mecânicas dos corpos de prova conforme os dados do fabricante.

Característica	
Resistência a tração	510 MPa
Limite de Escoamento	343 MPa
Dureza Brinell	145 HB

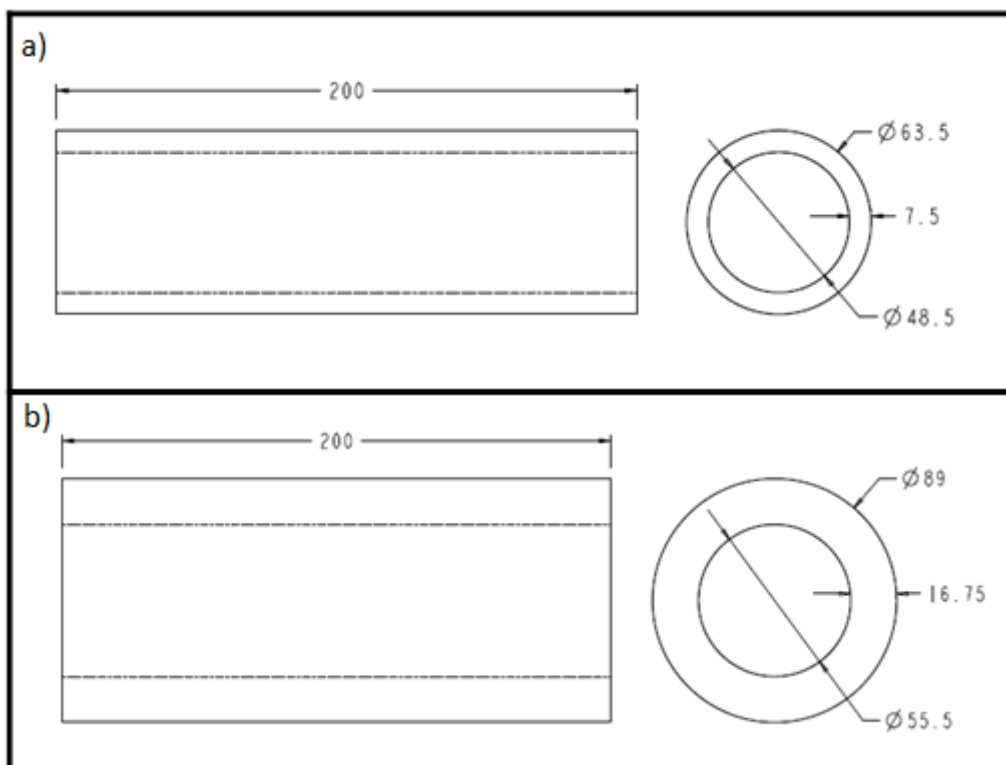


Figura 3.1 – Desenho dos corpos de prova utilizados nos experimentos (dimensões em mm). (a) Tubo laminado com diâmetro externo de 63,5 mm e (b) tubo laminado com diâmetro externo de 89 mm.

3.2 Corpo do Calorímetro

Na construção do calorímetro foram utilizados tubos e conexões de policloreto de polivinila clorado (CPVC). Este material apresenta baixa condutividade térmica e um baixo custo quando comparado com outros tubos para condução de água quente, o que motivou a sua utilização. Além das características citadas anteriormente, este material é

leve, resistente à corrosão e permite trabalhar com condução de fluidos em temperaturas de até 80 °C, porém não é recomendada a sua utilização na condução de vapor d'água.

O CPVC é um material que foi desenvolvido a partir do policloreto de polivinila (PVC), aumentando-se a composição em peso de cloro (Cl) do vinil. O policloreto de polivinila clorado apresenta uma composição química com teor, em peso, de aproximadamente 65% de cloro e de 35% de eteno, contra 57% e 43%, respectivamente, do PVC. Além destes componentes são acrescentados à mistura outros aditivos, pigmentos e estabilizantes necessários durante o processo de polimerização do material.

Conforme o fabricante, o policloreto de polivinila clorado apresenta uma condutividade térmica de 0,05 W/m·K, um valor relativamente baixo se comparado com outros materiais, como o PVC (0,17 W/m·K) e o aço (52,9 W/m·K). O composto de CPVC empregado na fabricação de tubos e conexões hidráulicas deve apresentar as seguintes propriedades físicas a uma temperatura de 23 °C ±2 °C, quando analisado conforme a norma ASTM D1784-07:

- Resistência mínima de impacto Izod: 80,1 J/m;
- Resistência à tração mínima: 48,3 MPa;
- Módulo de elasticidade mínimo sob tração: 2482 MPa;
- Temperatura mínima de deflexão sob carga de 1,82 MPa: 100 °C.

Para a montagem do corpo do calorímetro, foram utilizados tubos e conexões de CPVC da linha Aquatherm do fabricante Tigre. Utilizou-se uma tubulação com diâmetro externo nominal de 15 mm e espessura de parede de 1,6 mm, visando garantir uma vazão de água contínua com fluxo laminar.

3.3 Isolamento Térmico do Corpo de Prova

Objetivando reduzir as perdas de calor por convecção e por radiação na superfície exposta do corpo de prova, foram construídas duas calhas de PVC a partir de dois tubos partidos ao meio, e colou-se no interior delas uma lâmina de cortiça, como pode ser visualizado na Figura 3.2.

Foram utilizados dois tubos de policloreto de polivinila, sendo cada um destinado para um dos corpos de prova; o menor tubo, com diâmetro externo de 75 mm e espessura de parede de 4,2 mm foi utilizado de isolamento para o corpo de prova com diâmetro de 63,5 mm; o maior tubo, com diâmetro externo nominal de 110 mm e

espessura de parede de 6,1 mm foi utilizado para a proteção do corpo de prova de 89 mm.

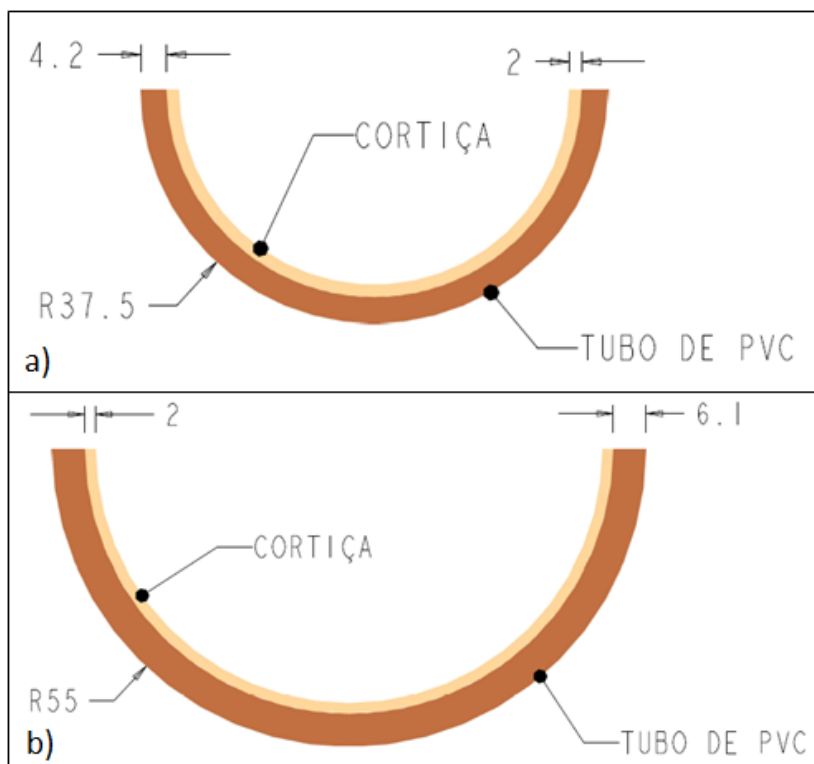


Figura 3.2 – Calhas utilizadas para isolamento dos corpos de prova. (a) Calha com tubo de PVC e cortiça de menor diâmetro e (b) calha com tubo de PVC e cortiça de maior diâmetro.

Como o PVC não resiste a grandes temperaturas, fez-se necessária a adição de uma lâmina de cortiça com 2 mm de espessura no interior das calhas, que foi fixada com a utilização de um adesivo de silicone para altas temperaturas. A cortiça é um material de origem biológica, formado por microcélulas (da ordem de 30 μm) mortas que apresentam normalmente uma forma poliédrica de 14 lados, dispostas de forma muito compactada. Tal material foi escolhido devido à sua baixa condutividade térmica, o que é desejável para evitar a perda de energia para o ambiente. Conforme a literatura (Gil, 1998; Fortes et al., 2004), a condutividade térmica da cortiça pode variar entre 0,028 W/m·K e 0,045 W/m·K, sendo este valor dependente da origem da cortiça e do processamento a qual foi submetida.

3.4 Acoplamento entre o Corpo do Calorímetro e o Corpo de Prova

Para realizar um rápido acoplamento do corpo do calorímetro ao corpo de prova e permitir uma troca fácil de corpos de prova, foram utilizadas rolhas de borrachas com um furo central passante, como pode ser observado na Figura 3.3. Este arranjo também permite que seja realizada a troca da rolha por outra de diferentes dimensões, possibilitando a utilização de corpos de provas tubulares com diferentes diâmetros.

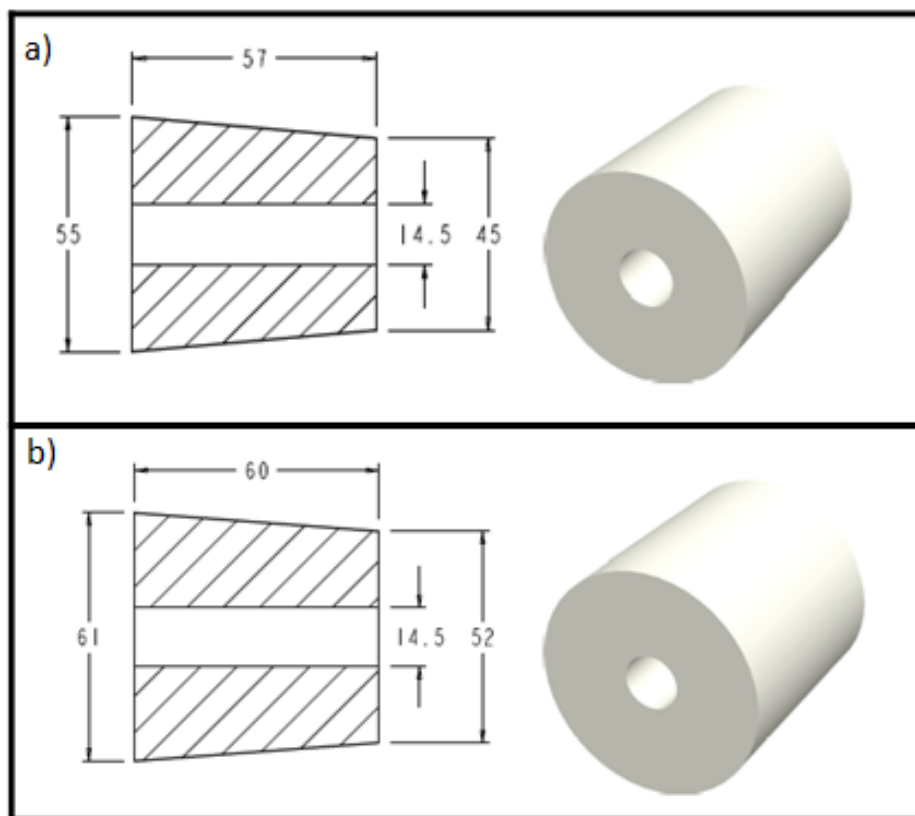


Figura 3.3 – Vista em corte e isométrica das rolhas utilizadas nos experimentos (dimensões em mm). (a) Rolha para os corpos de prova menores e (b) rolha para os corpos de prova maiores.

Conforme a representação na Figura 3.3, neste trabalho foram utilizadas rolhas com duas dimensões, sendo cada uma aplicada a um dos corpos de prova. Optou-se pela utilização de rolhas de borracha butílica, que suportam uma faixa de temperatura que vai de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ e apresentam uma baixa condutividade térmica e alta capacidade de tamponamento. Estas características são requeridas, uma vez que procura-se evitar a

perda de calor e vazamentos nas interfaces, e, ainda, a faixa de temperatura de trabalho do material deve ser condizente com a faixa de operação do equipamento.

3.5 Sistema de Alimentação de Água

Para garantir um fluxo constante de água no interior calorímetro, o sistema de alimentação deve assegurar que não ocorram quedas de pressão na linha de alimentação do calorímetro. Visando satisfazer esta condição, foi construído um sistema com um reservatório que mantém o nível de água constante e, portanto, uma pressão constante (coluna de água) na alimentação de água para o calorímetro. Na Figura 3.4 pode ser observado que o sistema desenvolvido é composto por uma tubulação de entrada no reservatório, uma caixa de água com capacidade máxima de 100 litros e pela tubulação de saída do reservatório. O nível constante de água é mantido por uma torneira com boia, a qual está instalada no interior da caixa.

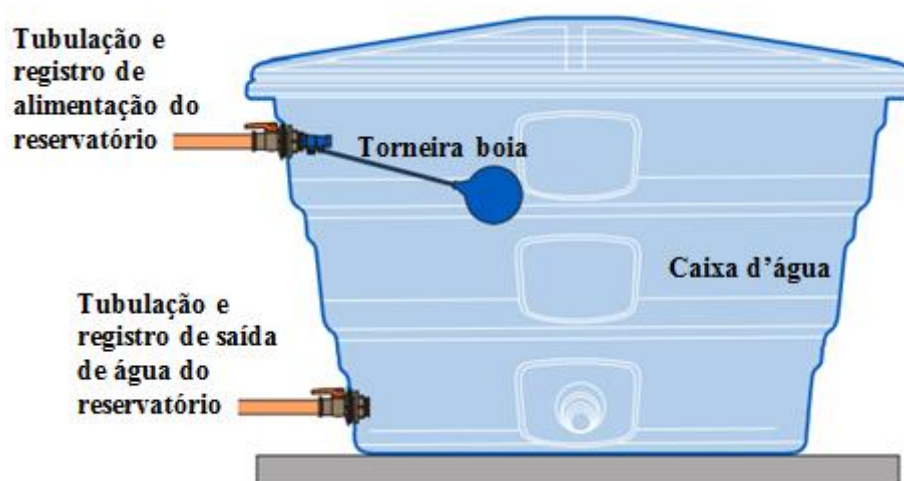


Figura 3.4 – Detalhe dos componentes utilizados no sistema de alimentação de água.

A caixa de água foi posicionada sobre um suporte móvel, que permite o deslocamento do sistema de alimentação conforme a necessidade. A alimentação do calorímetro é feita pelo ponto inferior do reservatório, o qual é alimentado pela entrada posicionada em seu ponto superior. Duas válvulas de esfera foram instaladas, uma na entrada e outra na saída da caixa da água, permitindo um fechamento do sistema quando ele não está em utilização.

A conexão do sistema de alimentação ao calorímetro foi realizada com o uso de mangueiras flexíveis transparentes. O mesmo material foi aplicado para realizar a conexão do ponto de alimentação de água da caixa ao encanamento de água do laboratório. A água utilizada nos experimentos foi suprida pelo Departamento Municipal de Água e Esgotos (DMAE) da cidade de Porto Alegre. A água bruta que chega até as estações de tratamento do departamento passa por processos de tratamento até que sejam atingidas as propriedades de qualidade para distribuição.

3.6 Sistema de Monitoramento de Temperatura

O monitoramento da evolução da temperatura da água na entrada e na saída do calorímetro durante o processo de soldagem é de suma importância para o cálculo do rendimento térmico do processo. Para realizar a medição da temperatura optou-se pela utilização de termopares do tipo T (par de cobre e constantan) que apresentam uma sensibilidade de $50 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$, que é uma das maiores entre os tipos de termopares mais comuns e por possuírem um baixo erro, que é da ordem de $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. A faixa de operação do sensor ($-270 \text{ }^\circ\text{C}$ a $400 \text{ }^\circ\text{C}$) atende às necessidades dos ensaios.

Os termopares foram fabricados com uma bainha de proteção em aço inoxidável AISI 304 com diâmetro de 3 mm e comprimento de 100 mm, na qual os fios do par condutor foram compactados com óxido de magnésio a fim de obter-se isolamento elétrica e ficando a junta completamente isolada das condições ambientais. Este isolamento, porém, diminui o tempo de resposta do sensor.

Nos experimentos foram utilizados quatro termopares, sendo dois posicionados na entrada e dois na saída. Na Figura 3.5 é possível visualizar o esquema de posicionamento dos termopares no calorímetro. Um dos sensores da saída e um da entrada foram montados em ligação diferencial. Nesta configuração, as ligações são feitas de forma que uma se opõe a outra, sendo um fio comum aos dois termopares. Assim, quando as temperaturas dos dois termopares forem iguais, a força eletromotriz resultante será igual a zero. No momento em que as temperaturas dos dois termopares estiverem em níveis diferentes, a diferença de potencial (mV) produzida será correspondente à diferença da temperatura entre os dois termopares. O esquema da ligação dos termopares de forma diferencial pode ser visualizada na Figura 3.6.

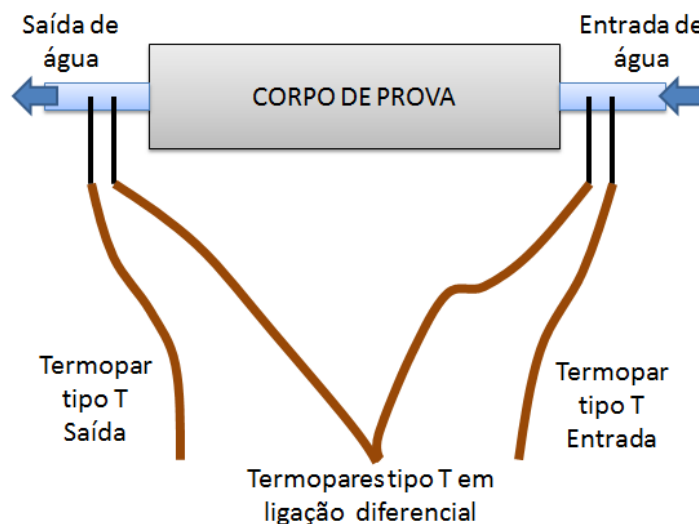


Figura 3.5 – Posicionamento dos termopares no calorímetro.

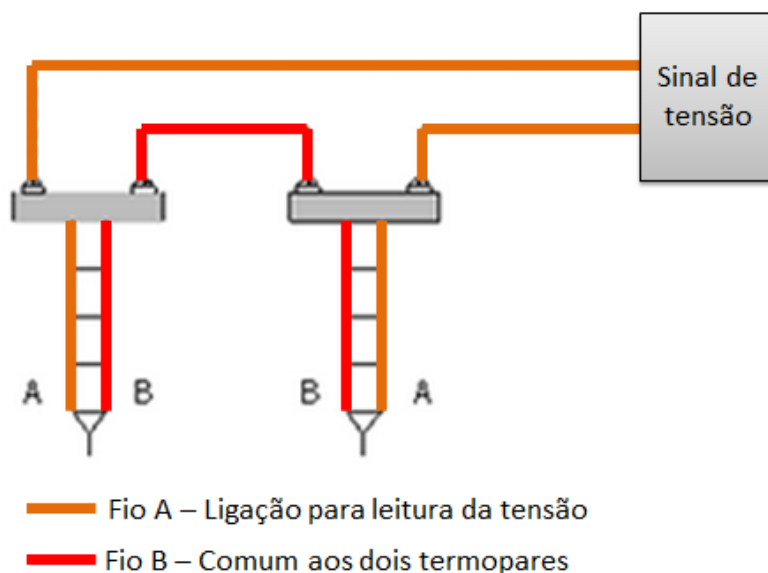


Figura 3.6 – Esquema de ligação dos fios de dois termopares para medidas de temperatura diferencial.

Para realizar o monitoramento das temperaturas utilizou-se o sistema de aquisição de dados ADS2000 IP, fabricado pela Lynx. O equipamento, que pode ser visualizado na Figura 3.7, já conta com um condicionador de sinais e junta fria eletrônica, o que permite a ligação direta dos sensores no sistema e a conversão automática do sinal de tensão em temperatura. Os dados obtidos durante os experimentos realizados foram salvos em arquivos para serem trabalhados

posteriormente em softwares para manipulação de dados. Na aquisição dos dados, as seguintes configurações foram utilizadas:

- Bits do conversor analógico/digital: 16;
- Ganho do sinal de entrada: 100 vezes;
- Filtro do sinal: 3 Hz;
- Frequência de amostragem: 10 Hz.

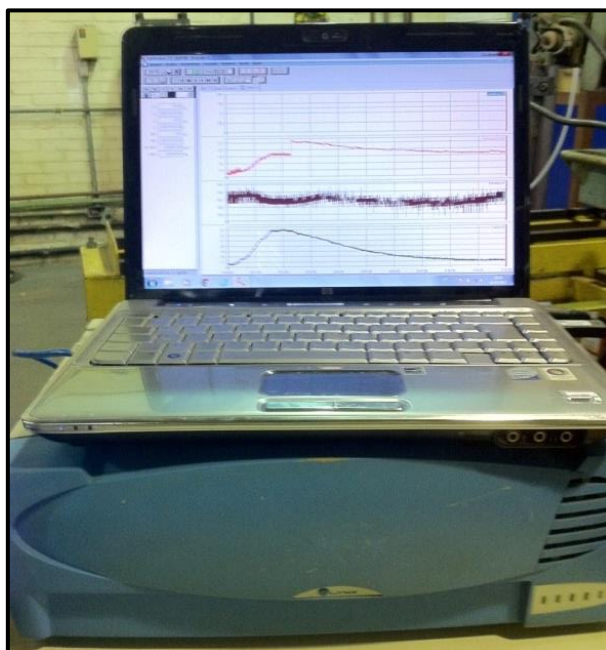


Figura 3.7 – Equipamento ADS2000 IP utilizado na aquisição de dados.

3.7 Sistema de Monitoramento da Soldagem

Para todos os ensaios realizados foi utilizado um sistema de aquisição de dados para monitoramento dos parâmetros instantâneos de soldagem. Utilizou-se o equipamento SAP v 4.01, fabricado pela empresa IMC Soldagem. Este sistema já conta com diferentes sensores que mensuram a corrente de soldagem, tensão de soldagem, velocidade de alimentação do arame e vazão do gás de proteção. Além dos valores instantâneos, o equipamento realiza a leitura dos valores médios e eficazes da corrente e tensão, de potência e de tempo de arco aberto.

Os dados obtidos durante os ensaios realizados foram armazenados utilizando o software disponibilizado pelo próprio fabricante, para posterior análise. Para os experimentos utilizou-se uma taxa de amostragem de 5 kHz e uma conversão de sinal

analógico/digital de 10 bits. A Figura 3.8 mostra os componentes do sistema de aquisição de dados de soldagem.

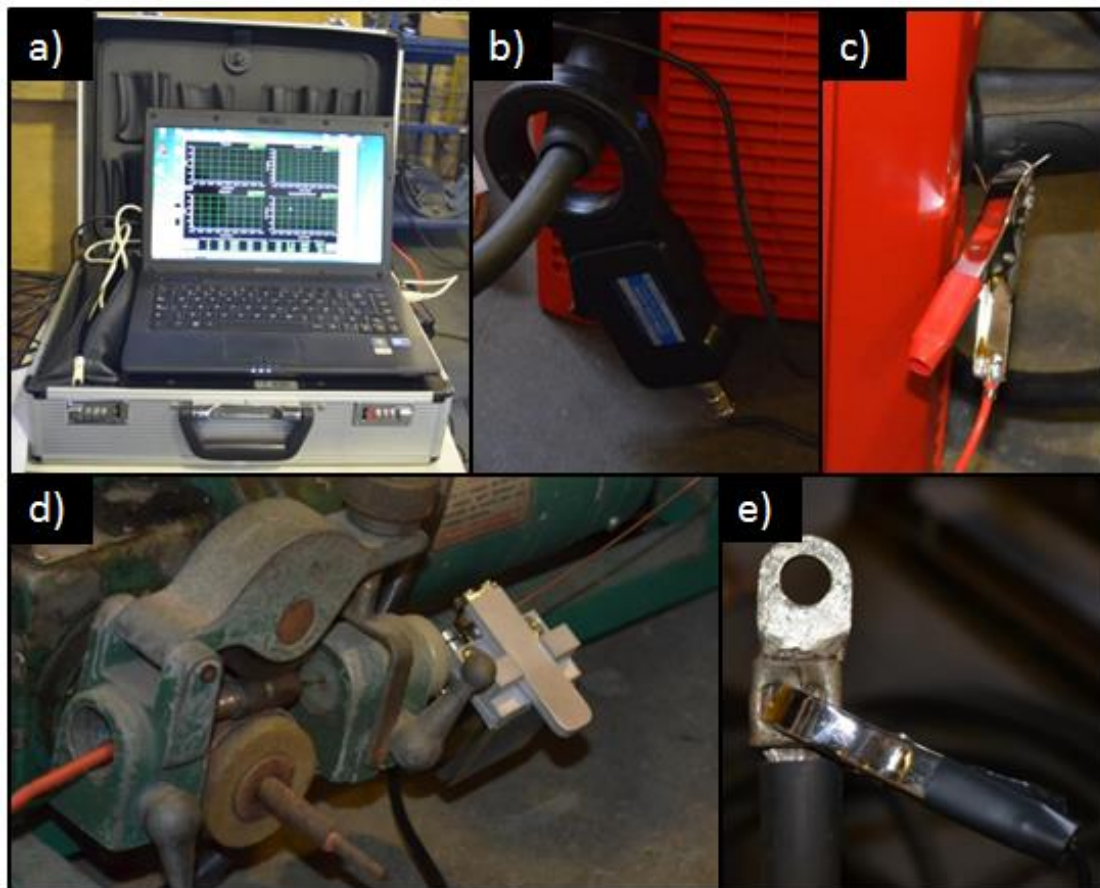


Figura 3.8 – Sistema utilizado para aquisição de dados: (a) computador e condicionador de sinais; (b) sensor de corrente de soldagem ligado ao cabo da fonte; (c) garra do sinal de tensão conectada à fonte; (d) sensor de velocidade de alimentação do arame posicionado no suporte do rolo de arame e (e) garra de aterramento presa ao cabo terra.

3.8 Equipamentos de Soldagem

3.8.1 GMAW

Para realizar os experimentos e avaliar o rendimento térmico dos processos de soldagem MIG/MAG, utilizou-se de um sistema robotizado composto pela fonte TransPuls Synergic 4000R da Fronius, pelo robô MA1400 da Yaskawa Motoman Robotics, pelo alimentador de arame VR 1500 4R/W/E Roboter, também da Fronius, e

pelo manipulador iCAT com cabos e tocha de soldagem Robo WH, ambos de fabricação da Abicor Binzel.

A fonte de soldagem, apresentada na Figura 3.9, apresenta a característica de ser completamente digitalizada e possui controle interno por microprocessador, o que garante repetitividade dos parâmetros ajustados e que podem ser salvos em posições de memória para posterior utilização. A fonte também é dotada de um inversor de pequenas dimensões e peso, o que facilita seu transporte. Alguns dos dados técnicos da fonte são apresentados na Tabela 3.3, conforme o informado pelo fabricante.



Figura 3.9 – Fonte utilizada nos processos de soldagem MIG/MAG.

Tabela 3.3 – Dados técnicos da fonte TransPuls Synergic 4000R.

Característica	
Tensão de rede	3 x 400 V
Potência do Primário	12,4 kVA
Fator de Potência	0,99
Faixa de Corrente de Soldagem	3 - 400 A
Tensão em Vazio	70 V
Tensão Operacional	14,2 V – 34 V

O alimentador de arame VR 1500 4R/W/E Roboter foi desenvolvido especialmente para aplicações robóticas. Montado sobre o terceiro membro do robô, o equipamento é regulado digitalmente, possui um sistema com 4 roletes, é compacto e leve. A velocidade de alimentação do arame pode ser regulada entre uma faixa que vai de 0,5 m/min até 22 m/min. Na Figura 3.10 é possível observar o alimentador de arame utilizado nos experimentos.

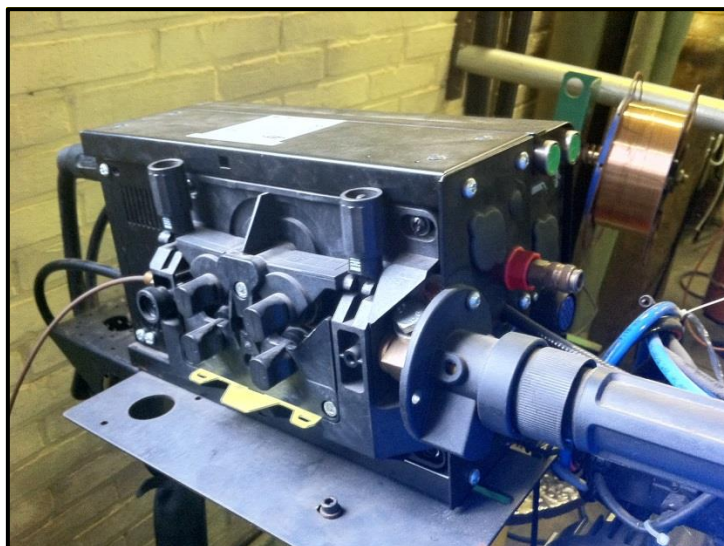


Figura 3.10 – Alimentador de arame VR 1500 4R/W/E Roboter.

O robô de soldagem MA1400 é comandado pelo controlador DX100. Este controlador permite executar tarefas com até 8 robôs, movimentando 72 juntas simultaneamente com no máximo 18 programas sendo executados simultaneamente. A memória interna permite que sejam salvas até 10.000 instruções de comando. No total, o controlador possui 40 entradas e 40 saídas digitais, sendo 16 utilizadas pelo sistema interno e 24 configuráveis pelo usuário.

A interface homem-máquina (IHM) também chamada de TeachPedant (TP) possui três modos operacionais: *play* (rodar), *teach* (ensinar) e *remote* (remoto). Operando a IHM é possível realizar o desligamento dos servo-motores, pausar a execução de movimentos e acionar a parada de emergência do equipamento. A linguagem de programação utilizada pelo controlador é a INFORM III. É possível realizar a escrita dos programas em um computador e então realizar o download para o controlador, porém neste trabalho, utilizou-se o TP para desenvolver o programa de soldagem. Utilizando o modo *teach* do TeachPedant, realizou-se a gravação dos pontos

inicias e finais do cordão de solda, fez-se a regulagem da velocidade de deslocamento da tocha, a chamada do programa de configuração da fonte e a determinação dos tempos de abertura e fechamento do arco. Na Figura 3.11 são apresentados o controlador e a IHM.

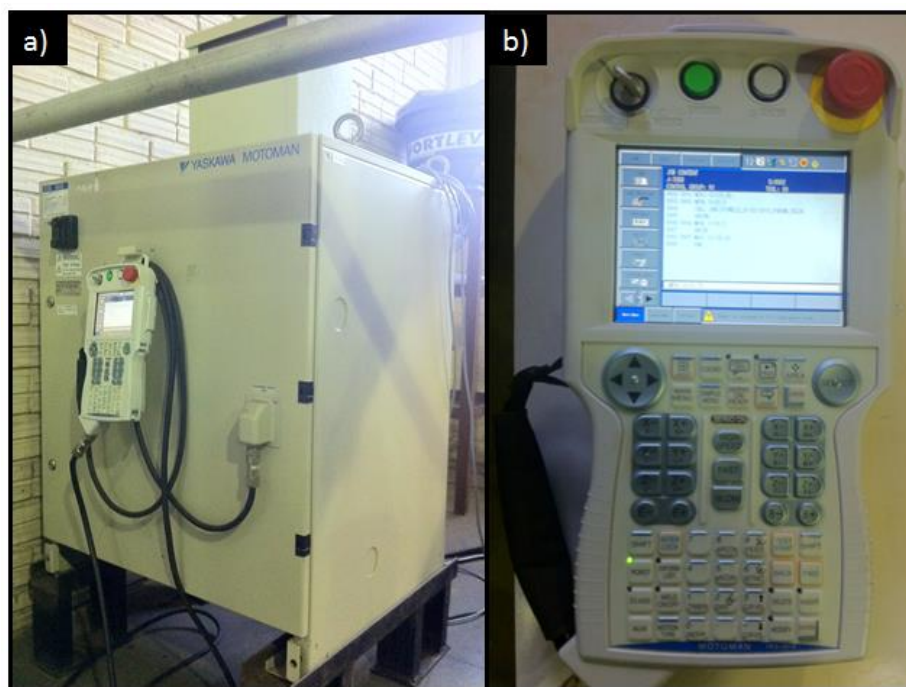


Figura 3.11 – Equipamentos utilizados: (a) controlador DX 100 e (b) interface homem-máquina na tela de configuração do programa de soldagem.

O MA1400, que pode ser observado na Figura 3.12, é um robô com 6 graus de liberdade (GDL), sendo todos eles originários das suas juntas rotativas. Deste total, 3 GDL são utilizados para localizar ou posicionar o órgão terminal (tocha de soldagem) e os outros 3 para orientar. As juntas permitem uma rotação média de $\pm 175^\circ$ com uma velocidade angular máxima de 200 graus/s. O órgão terminal do robô possui um alcance vertical de aproximadamente 2,5 m na vertical e 1,5 m na horizontal. A carga máxima de instalação no órgão terminal é de 3 kg.

Uma das grandes vantagens em se utilizar um robô para soldagem é a alta repetitividade atingida com este equipamento. O MA1400 possui uma repetitividade de $\pm 0,08$ mm na movimentação do órgão terminal. Nesta posição encontra-se um manipulador iCAT com cabos e tocha de soldagem modelo Robo WH. O manipulador permite que o conjunto de cabos passe por dentro do punho esférico do robô, assim tem-se um elevado nível de segurança e flexibilidade para tochas com refrigeração. Caso

ocorra uma colisão entre a tocha de soldagem e o corpo de prova, o iCAT realiza um desvio de até 10° por meio de mecanismos mecânicos e, além disso, possui uma função amortecedora, a fim de evitar danos à tocha, periféricos e bem como ao robô. O manipulador e a tocha de soldagem podem ser visualizados na Figura 3.13.

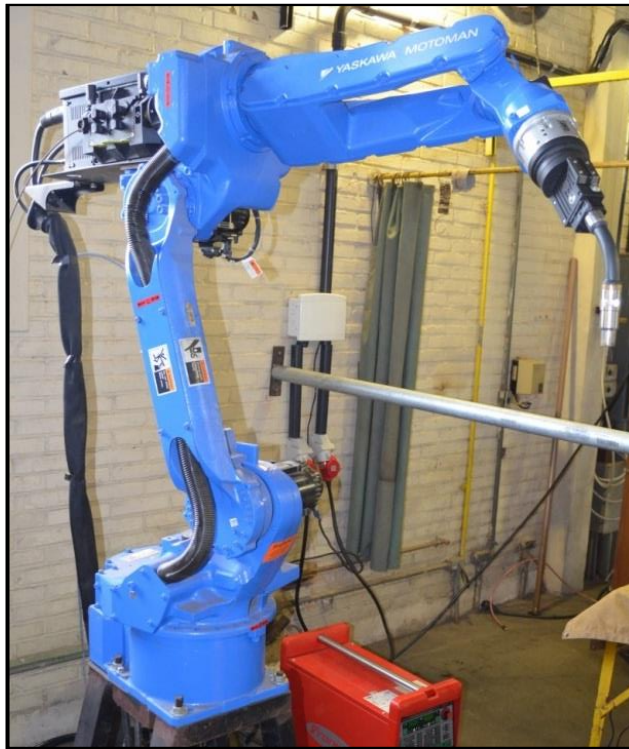


Figura 3.12 - Robô MA1400 da Yaskawa Motoman Robotics.

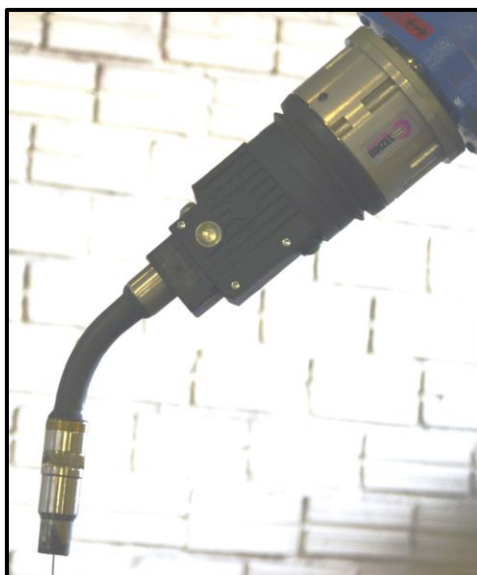


Figura 3.13 – Manipulador iCAT e tocha de soldagem MIG/MAG instalados no órgão terminal do robô.

O sistema de cabos Robo WH permite um acoplamento e desacoplamento rápido da tocha de soldagem, facilitando a troca de componentes, como o bico de contato e o bocal, que muitas vezes devem ser substituídos conforme a soldagem a ser realizada.

O arame utilizado nos experimentos foi o AWS ER70S-6 com diâmetro de 1,2 mm. A escolha deste material de adição está relacionada ao fato deste arame ser amplamente utilizado em processos de soldagem de aços comuns ao carbono. Na Tabela 3.4 é apresentada a composição química do arame, conforme os dados informados pelo fabricante.

Tabela 3.4 – Propriedades nominais do arame AWS ER70S-6.

Composição Química, %	
C	0,06 – 0,15
Si	0,8 – 1,15
Mn	1,4 – 1,85
P	< 0,025
S	< 0,035
Cu	< 0,5

3.8.2 GTAW

Nos experimentos em que se utilizou o processo de soldagem TIG, os seguintes equipamentos foram aplicados: fonte de soldagem Digiplus A7 450, fabricada pela IMC Soldagem, e um sistema automatizado para movimentação da tocha de soldagem modelo Tartílope v4, fabricado pela SPS.

A fonte de soldagem Digiplus A7 450, apresentada na Figura 3.14, é dotada um microprocessador que permite o controle na utilização de diferentes processos de soldagem. O sistema de controle é baseado em um controlador que possibilita a completa operação da fonte com o uso de um software computacional, possibilitando o desenvolvimento de um programa de soldagem para cada aplicação, além da comunicação com outros sistemas automatizados. Outra característica desta fonte de soldagem é a possibilidade de armazenar as variáveis e parâmetros configurados na memória do controlador para posterior utilização.

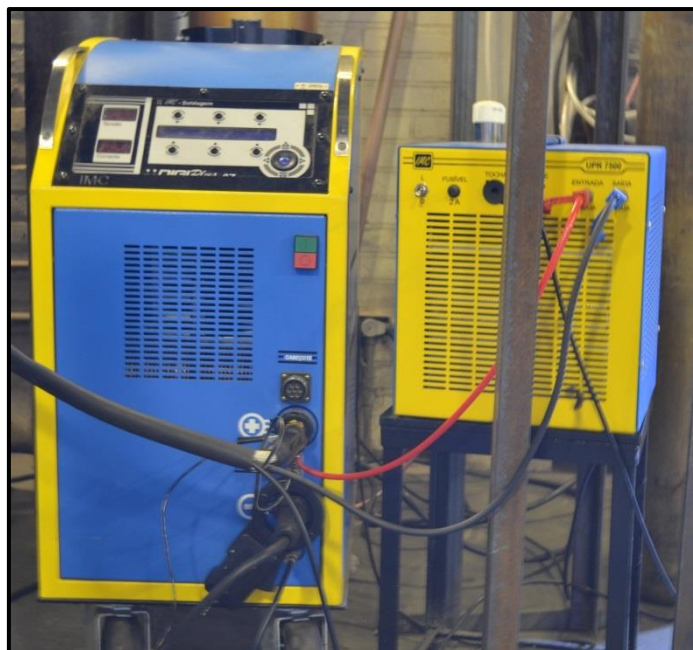


Figura 3.14 – Fonte utilizada nos experimentos com soldagem TIG.

A arquitetura da fonte de potência é chaveada no secundário e se utiliza de transistores para controlar o parâmetro de soldagem desejado, realizando o bloqueio ou liberação do fluxo de corrente pelo transistor. A fonte também é dotada de um filtro, que tem por objetivo obter um melhor fator de potência. Alguns dos dados técnicos da fonte são apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Características constitutivas da fonte Digiplus A7 450.

Característica	
Tensão de Rede	220/380/440 V
Potência do Primário	10 kVA
Fator de Potência	0,94
Faixa de Corrente de Soldagem	5 - 450 A
Tensão em Vazio (Regulável)	50/68/85 V
Ripple de Corrente	8 A

O sistema automatizado de deslocamento da tocha de soldagem Tartílope v4 é constituído basicamente por 4 módulos: o manipulador da tocha que possui 4 GDL, o controlador, a IHM e o controle remoto para correção manual da trajetória. Estes módulos são apresentados na Figura 3.15.

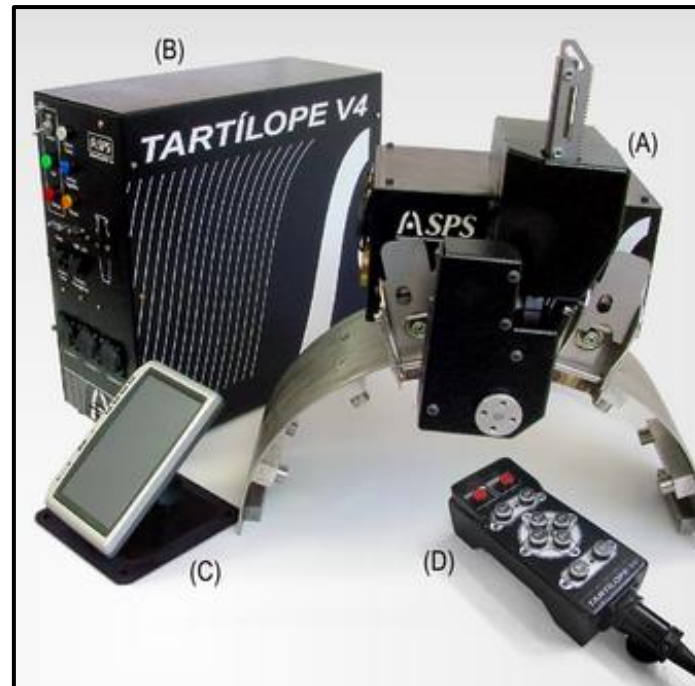


Figura 3.15 – Módulos do sistema Tartílope v4: (a) manipulador da tocha de soldagem; (b) controlador; (c) interface homem-máquina e (d) controle remoto [Fonte: SPS, 2013].

O manipulador é dotado de três juntas prismáticas que se movimentam pelo sistema cartesiano e uma junta rotacional, que é utilizada para orientar a tocha de soldagem. Um dos eixos corresponde ao deslocamento do manipulador sobre um trilho, que pode ser flexível ou rígido, no sentido de soldagem. Outro eixo tem o papel de fazer movimentos de tecimento de formas pré-definidas e a última junta prismática é utilizada para ajustar a distância entre a tocha e a peça de trabalho (regulagem da distância bico de contato-peça). As juntas prismáticas possuem uma velocidade linear máxima de 5 m/min e a junta rotacional uma velocidade angular máxima de 900 graus/min. Na Figura 3.16 pode-se visualizar a posição e os sentidos de deslocamento de cada uma das juntas do Tartílope v4.

Na interface homem-máquina é realizada a entrada dos parâmetros de movimentação do Tartílope v4 antes do início do processo de soldagem. É possível fazer a regulagem da trajetória, da velocidade de soldagem e do tecimento desejado. A trajetória pode ser corrigida manualmente pelo uso do controle remoto, movimentando-se cada uma das juntas conforme o necessário. O controle também permite a inicialização do movimento do equipamento e o disparo da fonte de soldagem, que neste caso deve estar conectada ao controlador. Além das funções já descritas, também

é possível de ser realizada a parada de emergência do sistema com o uso do controle remoto.

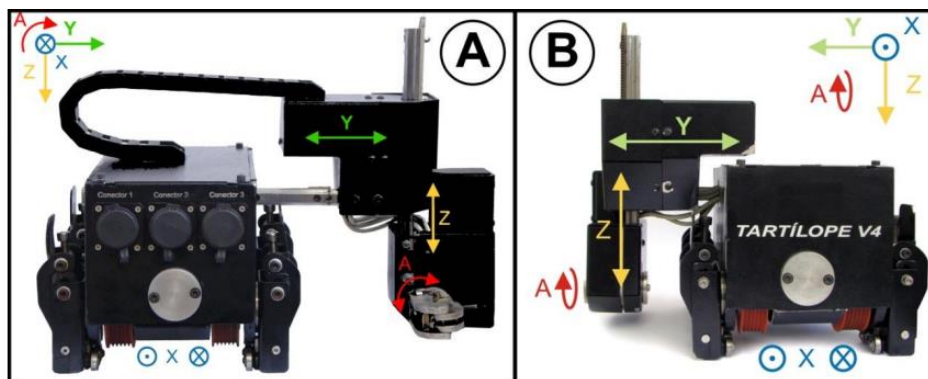


Figura 3.16 – Representação das juntas do Tartilope v4 no (a) arranjo para soldagem de tubos e (b) arranjo para soldagem de dutos [Fonte: SPS, 2013].

Nos experimentos com soldagem TIG foi realizada uma solda autógena, ou seja, não foi utilizado metal de adição no processo. O eletrodo utilizado foi o EWTh-2 (Tório 2%) com diâmetro de 2,4 mm. Este tipo de eletrodo tem excelente resistência à contaminação da solda, fácil ignição e mantém um arco estável quando operando em corrente contínua. A escolha por este tipo de eletrodo se deu devido ao fato de ele ser recomendado para o material base do corpo de prova e sua corrente de trabalho (faixa entre 100 A e 150 A) ser adequada para os experimentos. O ângulo de afiação da ponta do eletrodo utilizado foi de 45°, uma vez que o dispositivo de desbaste disponível no laboratório estava calibrado para este ângulo.

3.8.3 SAW

A soldagem ao arco submerso foi realizada com o uso do conjunto de equipamentos Unionmelt AS-800, desenvolvidos pela White Martins. O dispositivo, que pode ser observado na Figura 3.17, é composto pela fonte de energia V-800, unidade de controle Unionmelt CAS-100, carro de deslocamento e cabeçote alimentador de arame Unionmelt AS-100 e tocha de soldagem Unionmelt AS-1200R.

A fonte de energia V-800 é um transformador-retificador de tensão constante. Na fonte, é possível realizar o ajuste da faixa de tensão de soldagem entre os níveis 0 (mínimo) e 10 (máximo) pelo acionamento manual de um dos interruptores do seu painel. Na Tabela 3.6 são apresentados dados técnicos da fonte V-800.



Figura 3.17 – Conjunto Unionmelt AS-800 utilizado na soldagem ao arco submerso.

Tabela 3.6 – Dados técnicos da fonte de energia V-800.

Característica	
Tensão de Alimentação	220/380/440 V
Corrente de Alimentação	119/69/59,5 A
Fator de Potência	0,98
Saída Auxiliar	110 V/15 A
Tensão Operacional	25 V – 53 V

Na Figura 3.18 é possível visualizar a unidade de controle Unionmelt CAS-100, a qual permite o controle do processo de soldagem. Nela é realizado o ajuste da velocidade de alimentação do arame com o uso de um potenciômetro. A velocidade pode ser regulada entre 0,8 m/min e 8 m/min. Outro potenciômetro, o qual se comunica com a fonte de energia, também permite a regulação da tensão de soldagem. Interruptores diversos permitem iniciar o processo de soldagem, energizar o equipamento e avançar ou retroceder o arame.



Figura 3.18 – Unidade de Controle CAS-100.

Além dos interruptores para regulagem dos parâmetros de soldagem, a unidade de controle possui sinais luminosos que se acendem quando o arame está em contato com o corpo de prova e quando o equipamento está energizado. Um voltímetro e um amperímetro indicam a tensão e a corrente de soldagem, respectivamente.

O cabeçote alimentador de arame, que está fixo sobre o carro de deslocamento, é dotado de um bloco de alinhamento que elimina as curvaturas do arame e um bloco de alimentação, composto por um rolo de pressão e um rolo de alimentação. Um motor ligado a um redutor é responsável pelo acionamento do rolo de tração do arame. No carro de deslocamento é realizado o ajuste da velocidade de soldagem e o sentido de deslocamento. O sistema permite trabalhar com velocidades entre 1,5 mm/s e 15 mm/s. Ele se comunica com a unidade de controle, iniciando o movimento no instante em que o operador realiza o comando para abertura do arco.

A tocha de soldagem Unionmelt AS-1200R foi projetada especialmente para a realização de soldagem ao arco submerso. A tocha permite trabalhar com uma corrente de soldagem máxima de 1200 A e com arames de diâmetro que vão de 2,4 mm até 6,4 mm.

Para os experimentos deste trabalho foi utilizado um arame EL12 com 2,4 mm de diâmetro. A composição química do arame, conforme o informado pelo fabricante, é apresentada na Tabela 3.7. A escolha deste material de adição está relacionada ao fato

de ele ser comumente utilizado em processos de soldagem ao arco submerso de aços ao carbono em geral.

Tabela 3.7 – Composição química nominal do metal de adição do processo de soldagem SAW.

Composição Química, %	
C	0,04 – 0,14
Si	< 0,1
Mn	0,25 – 0,60
P	< 0,03
S	< 0,03
Cu	< 0,35

Para proteção do arco elétrico e da poça de fusão durante a soldagem foi utilizado um fluxo aglomerado neutro (nome comercial Bavaria BF 6.5). Este fluxo apresenta um bom destacamento de escória e fusão uniforme nas laterais do cordão, sendo aplicável na soldagem com um único arame ou múltiplos arames, tanto em corrente contínua como corrente alternada. Segundo o fabricante, o fluxo pode ser utilizado com uma extensa gama de parâmetros de soldagem, sendo a corrente máxima aplicável de 1000 A. A escolha por este fluxo foi motivada pela sua disponibilidade no laboratório de soldagem. A composição química do fluxo é apresentada na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Composição química nominal do fluxo de soldagem.

Composição Química, %	
SiO ₂ + TiO ₂	20
AlO ₃ + MnO	30
CaO + MgO	30
CaF ₂	17

3.9 Metodologia Utilizada para Medição da Vazão de Água do Calorímetro

Para medir a vazão de água durante os ensaios, foi colocado um balde graduado após a linha de saída de água do calorímetro. Foi posicionada, alinhada com o centro do

recipiente, uma câmera montada sobre um tripé, a qual realizou o monitoramento do enchimento do balde, conforme é possível visualizar na Figura 3.19.



Figura 3.19 – Sistema para monitoramento da vazão de água.

O vídeo gerado pela gravação foi analisado quadro a quadro em um software gráfico computacional. Com a diferença de tempo entre dois níveis de água consecutivos, é possível obter a vazão de água V_{H_2O} em litros/s pela Equação 3.1.

$$V_{H_2O} = \frac{N_{qf} - N_{qi}}{t_{qf} - t_{qi}} \quad (3.1)$$

onde N_{qi} e N_{qf} são dois níveis consecutivos de água no balde em litros e t_{qi} e t_{qf} são os tempos em s de cada um destes níveis. Os sub-índices “qi” e “qf” se referem ao quadro inicial e ao quadro final da imagem, respectivamente.

A Figura 3.20 mostra dois quadros de um filme analisado. Para o cálculo da vazão utilizou-se apenas os centésimos de segundos, sendo desconsiderados os milésimos de segundo.

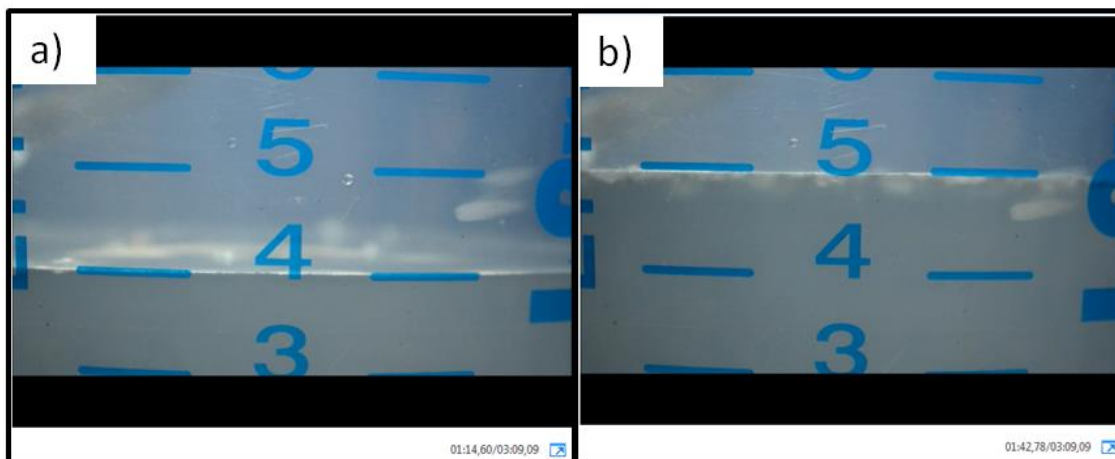


Figura 3.20 – Imagem de captura de tela do filme gerado durante o monitoramento do sistema em operação. Quadro referente (a) ao nível de água equivalente a 4 litros e (b) ao nível de água equivalente a 5 litros.

3.10 Metodologia de Cálculo da Potência Elétrica

Conforme a revisão apresentada no Item 2.2 deste trabalho, um dos métodos que é recomendado para o cálculo da potência elétrica do arco é utilizando a potência instantânea média, uma vez que este método leva em consideração as variações que ocorrem na corrente e na tensão durante os processos de soldagem.

Neste trabalho foi utilizada a Equação 2.1 para obter a potência elétrica do arco a partir dos dados registrados pelo sistema de aquisição de dados durante o monitoramento dos processos de soldagem. Dois tipos de curvas são esperadas para os processos analisados. A Figura 3.21 apresenta a curva para o processo de soldagem GMAW e na Figura 3.22 pode observar-se a curva para o processo de soldagem GTAW.

Conforme pode ser observado nas Figuras 3.21 e 3.22, para o cálculo da potência elétrica do arco dos processos de soldagem, considerou-se a região compreendida entre o momento logo após a abertura do arco em que a corrente deixa de ser nula e o anterior ao fechamento do arco, quando a corrente de soldagem retorna ao nível nulo.

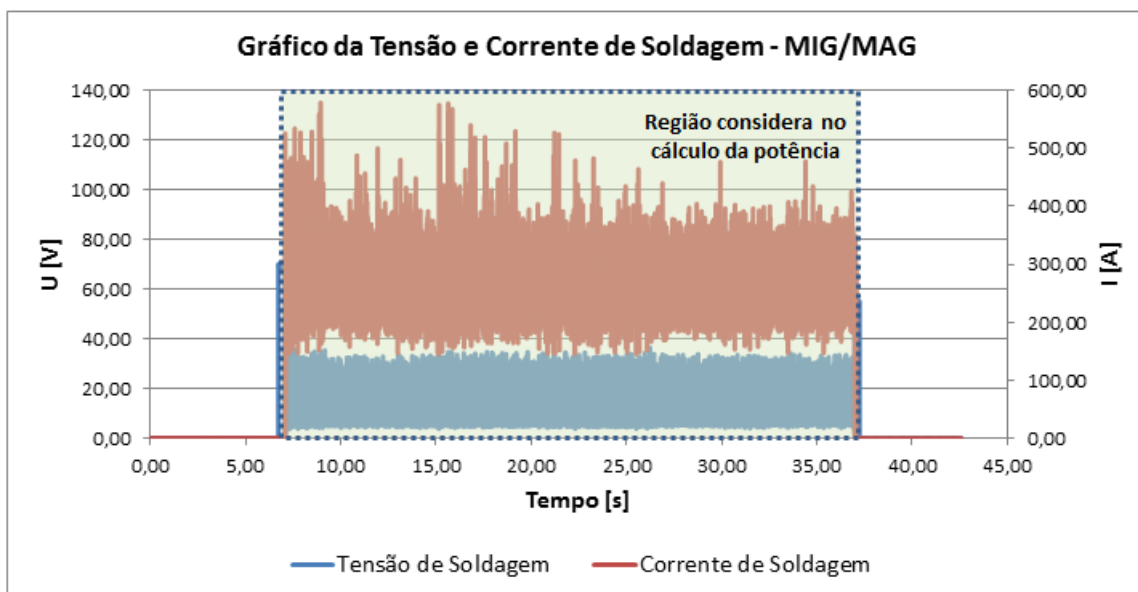


Figura 3.21 – Curvas típicas de tensão e corrente de soldagem para o processo de soldagem GMAW. Em destaque a região utilizada no cálculo da potência instantânea média.

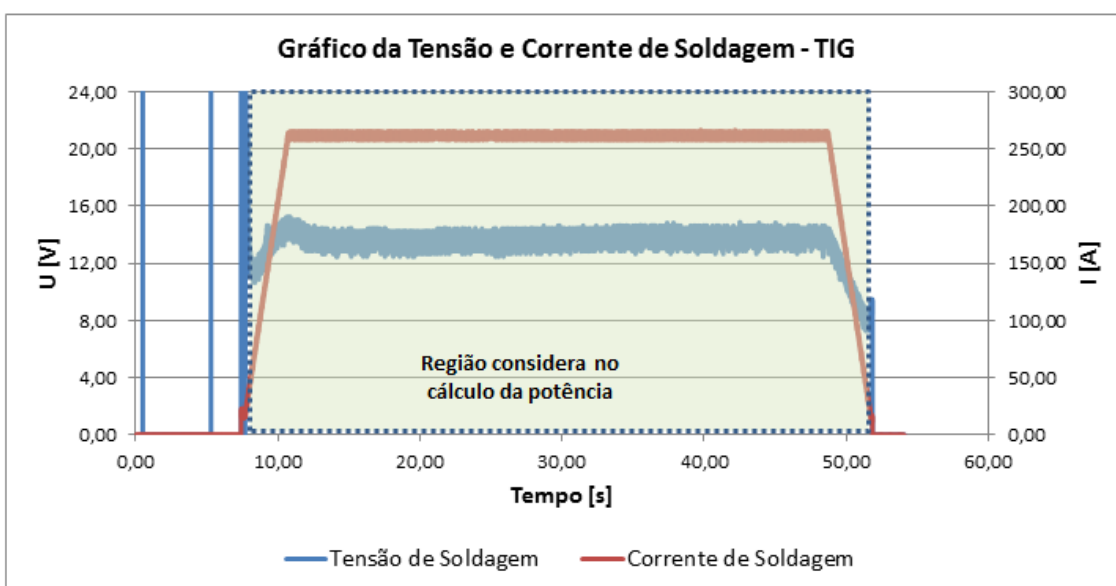


Figura 3.22 – Curvas típicas de tensão e corrente de soldagem para o processo de soldagem GTAW. Em destaque a região utilizada no cálculo da potência instantânea média.

3.11 Metodologia de Cálculo da Energia de Soldagem

A energia de soldagem envolvida nos processos analisados neste trabalho foi calculada conforme a Equação 2.2. Utilizou-se a potência elétrica, calculada conforme as considerações do item anterior, e a velocidade de soldagem regulada no equipamento de soldagem durante os experimentos.

3.12 Metodologia para Obtenção do Aporte Térmico

O aporte térmico foi obtido com o uso dos princípios de calorimetria. Para o calorímetro construído neste trabalho, a energia entregue ao corpo de prova pode ser obtida com a Equação 3.2.

$$Q_a = \int_0^t \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_s - T_e) \cdot dt \quad (3.2)$$

onde \dot{m} é a vazão mássica de água que passa pelo calorímetro em kg/s, c_p é o calor específico da água em J/kg·K, T_s e T_e são as temperaturas de saída e entrada da água no calorímetro, respectivamente, ambas em K e t é o tempo total da aquisição de dados, em s.

O calor específico e a densidade são propriedades tabeladas da água que variam juntamente com a temperatura. Por simplificação, estas propriedades foram consideradas constantes, utilizando seus valores tabelados na temperatura de entrada da água no calorímetro (T_e) de cada ensaio. A vazão mássica de água permanece constante durante a realização dos experimentos, desse modo a Equação 3.2 fica:

$$Q_a = V_{H_2O} \cdot \rho \cdot c_p \cdot \int_0^t (T_s - T_e) \cdot dt \quad (3.3)$$

onde ρ é a massa específica da água em kg/m³.

A integral da variação de temperatura no intervalo de tempo analisado é equivalente à área sob o gráfico do sinal obtido com o monitoramento da temperatura da água do calorímetro. Espera-se para os experimentos obter um sinal como apresentado na Figura 3.23.

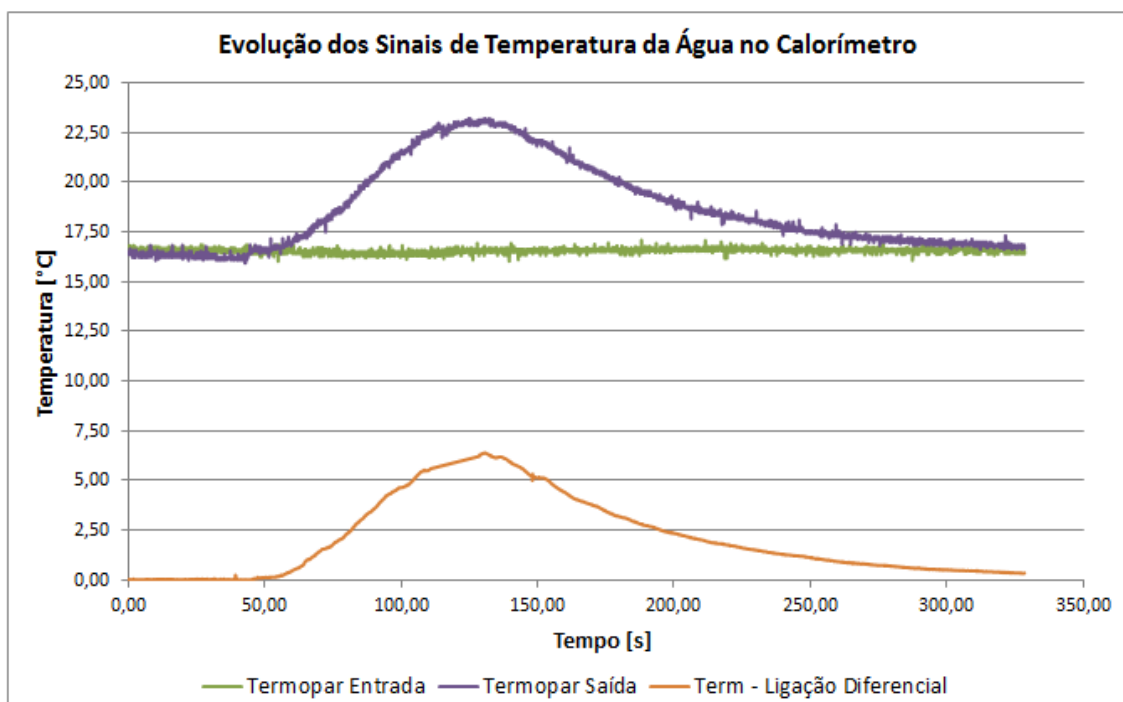


Figura 3.23 – Evolução dos sinais de temperatura da água esperada para os ensaios. Em verde é representada a evolução da temperatura da água na entrada do calorímetro, que deve ser constante, em roxo, a temperatura de saída da água e em laranja a subtração dos dois sinais obtida com o uso dos termopares em ligação diferencial.

Percebe-se a existência de três curvas resultantes. Uma está associada com a medição de temperatura da água no ponto de entrada do calorímetro, outra, com a medição de temperatura da água no ponto de saída do calorímetro, e a última curva é gerada pelos termopares em ligação diferencial, que deve ser equivalente à subtração das duas curvas anteriores.

Os dados obtidos pelo sistema de aquisição foram analisados e tratados no software Microsoft Office Excel. É possível que, devido a interferências elétricas ou outros fatores fora de controle, alguns pontos da amostragem não representem valores condizentes com o experimento, portanto estes pontos foram eliminados da curva. Também foi eliminado o conjunto de pontos antes de ocorrer o aquecimento da água. Padronizou-se para os ensaios que o monitoramento de temperatura seria encerrado 20 segundos após o momento em que a variação de temperatura entre a entrada e a saída de água fosse equivalente à metade do erro do sensor, ou seja, $\pm 0,5$ °C. Um exemplo do tratamento de dados realizado conforme o descrito acima para uma situação hipotética pode ser observado na Figura 3.24.

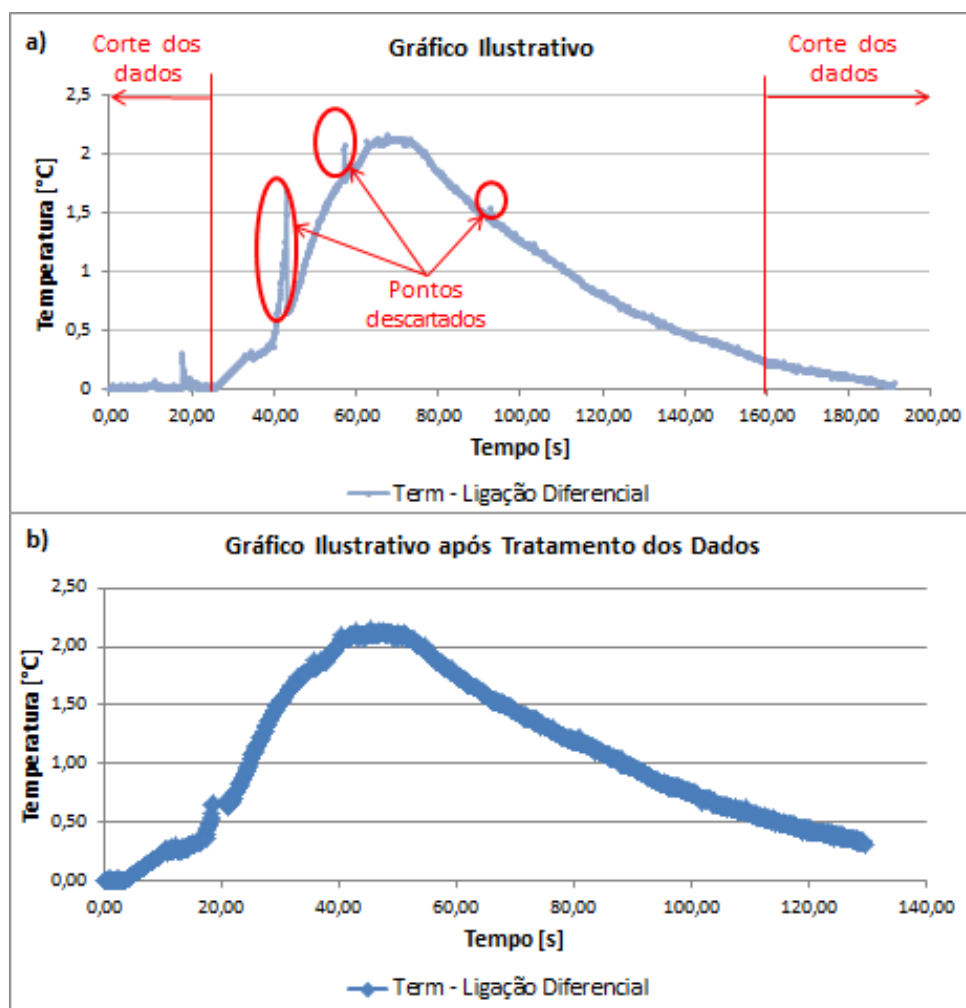


Figura 3.24 – Evolução da de temperatura com o tempo (a) antes e (b) após o tratamento de dados proposto.

Os dados tratados foram importados para o software MatLab, onde, por meio de um programa escrito na linguagem do software, foi realizada a integração das curvas. No cálculo do aporte térmico, deu-se preferência para a utilização do sinal gerado pelos termopares em ligação diferencial, sendo utilizada a diferença entre a temperatura de saída e a temperatura de entrada da água apenas nos casos em que o sinal dos termopares apresentasse muito ruído ou muitos pontos fora da curva ideal.

3.13 Planejamento Experimental

Para validar o funcionamento do calorímetro construído, bem como avaliar sua dinâmica em funcionamento, foi proposto realizar primeiramente testes utilizando o processo de soldagem GMAW com o emprego do robô descrito anteriormente. Com

base nos resultados obtidos nos testes, foram realizados os ensaios propostos para avaliar o aporte térmico e o rendimento do arco do processo de soldagem GMAW. Então, após a análise dos resultados deste processo, foram definidos dentre os ensaios que foram inicialmente propostos no planejamento experimental, aqueles que seriam realizados para avaliar os processos de soldagem GTAW e SAW. Para todos os ensaios procurou-se utilizar a mesma vazão de água, sendo esta determinada pelos ensaios teste.

A escolha dos parâmetros de soldagem dos três processos utilizados para validação do calorímetro não visou reproduzir experimentos realizados por outros autores, nem atender valores recomendados em procedimentos de soldagem. Procurou-se, dentro das regulagens possíveis de cada fonte de soldagem, realizar ensaios com diferentes níveis de energia de soldagem compreendidos na faixa que vai de 500 J/mm a 2000 J/mm.

3.13.1 Planejamento Experimental do Processo GMAW

Na Tabela 3.9 são apresentados os experimentos planejados para o processo de soldagem MIG/MAG, que foram propostos para avaliar o aporte térmico e o rendimento térmico para diferentes níveis de energia de soldagem. O gás de proteção utilizado para os experimentos propostos foi uma mistura Ar + 10% CO₂, com uma vazão de 15 litros/min, e a distância bico de contato-peça (DBCP) também foi mantida constante para todos os ensaios, sendo esta de 18 mm.

Tabela 3.9 – Experimentos propostos para o processo de soldagem GMAW.

Ensaio	U [V]	I [A]	v_s [mm/s]	Diâmetro do CP [mm]	Calhas de Isolamento
GMAW_01	20	125	5	63,5	SIM
GMAW_02	20	250	5	63,5	SIM
GMAW_03	30	340	10	63,5	SIM
GMAW_04	20	250	5	63,5	NÃO
GMAW_05	20	125	5	89,0	SIM
GMAW_06	30	340	10	89,0	SIM
GMAW_07	30	350	5	89,0	SIM

3.13.2 *Planejamento Experimental do Processo GTAW*

O planejamento dos experimentos a serem realizados com o processo de soldagem TIG é apresentado na Tabela 3.10. Para todos os ensaios realizados aplicaram-se as seguintes condições:

- Gás de proteção: 100% Ar;
- Vazão de gás de proteção: 12 litros/min;
- Corrente contínua com eletrodo negativo;
- Distância da ponta do eletrodo à peça (L_a): 2 mm;
- Uso das calhas de isolamento.

Tabela 3.10 – Experimentos propostos para o processo de soldagem GTAW.

Ensaio	I [A]	v_s [mm/s]	Diâmetro do CP [mm]
GTAW_01	200	5,0	63,5
GTAW_02	200	2,5	63,5
GTAW_03	200	1,25	63,5
GTAW_04	250	2,5	63,5
GTAW_05	250	2,0	89,0
GTAW_06	250	1,0	89,0

3.13.3 *Planejamento Experimental do Processo SAW*

Para os experimentos com o processo de soldagem ao arco submerso manteve-se fixa a DBCP, a qual foi de 20 mm. A Tabela 3.11 apresenta os parâmetros de soldagem dos experimentos propostos para a avaliação do aporte térmico e do rendimento térmico com o uso de calorimetria.

Tabela 3.11 – Experimentos planejados para o processo de soldagem SAW.

Ensaio	U [V]	v_a [m/min]	v_s [mm/s]	Diâmetro do CP [mm]
SAW_01	30	3,6	15	63,5
SAW_02	30	4,3	15	63,5
SAW_03	45	4,3	15	63,5
SAW_04	45	4,3	10	63,5
SAW_05	30	4,3	15	89,0
SAW_06	45	4,3	15	89,0

3.14 Testes Iniciais

A realização de testes iniciais teve como objetivo verificar o funcionamento do calorímetro e dos sistemas de aquisição de dados, visando identificar possíveis interferências nos sinais elétricos e falhas mecânicas. Foram realizados três cordões de solda em um único corpo de prova, com diferentes energias de soldagem e diferentes vazões de água, conforme pode ser visualizado na Tabela 3.12. Estes parâmetros iniciais foram definidos com referência em valores utilizados por outros autores em estudos anteriores.

Utilizou-se como gás de proteção uma mistura de Argônio, em 90%, e dióxido de carbono, em 10%, com uma vazão de 15 litros/min. A distância entre o bico de contato e o corpo de prova foi mantida constante em 12 mm e o corpo de prova utilizado nos testes preliminares foi o de menor diâmetro.

Tabela 3.12 – Parâmetros utilizados nos testes preliminares.

Teste	U [V]	I [A]	v_s [mm/s]	E_s [J/mm]	V_{H_2O} [litros/min]
SOLDA_1	27,0	310	5,0	1674	1,0
SOLDA_2	25,5	300	10,0	765	2,0
SOLDA_3	25,5	300	7,5	1020	2,0

Durante a montagem e preparação do calorímetro para realização do teste SOLDA_1 observou-se a ocorrência de vazamento de água pelos orifícios de passagem dos termopares. Este problema foi solucionado antes da realização dos testes posteriores. Outra falha ocorrida durante a realização do cordão de solda foi a perfuração do corpo de prova, comprometendo este teste completamente.

Já os resultados obtidos com os testes SOLDA_2 e SOLDA_3 foram satisfatórios. Não foram observados ruídos nos dados adquiridos e as curvas de aquecimento e resfriamento da água apresentaram um comportamento como o esperado. A temperatura máxima que a água atingiu durante o ensaio SOLDA_2 foi de 20,8 °C, e para o teste SOLDA_3, foi de 25,3 °C. Observando a mangueira de saída de água do calorímetro não visualizou-se a formação de bolhas de ar durante o decorrer dos ensaios. Com base nestes resultados, foi determinado que a vazão de água a ser utilizada

nos experimentos planejados para os processos de soldagem GMAW, GTAW e SAW seria de, no mínimo, 2 litros/min.

4 PROJETO, CONSTRUÇÃO E OPERAÇÃO DO CALORÍMETRO

O projeto do calorímetro visou satisfazer os objetivos propostos neste trabalho: desenvolver um sistema com fluxo de água constante que tenha baixo custo, seja adaptável aos diferentes processos de soldagem a arco elétrico, de operação simples, de fácil movimentação e que seja capaz de servir de instrumento para a avaliação do aporte térmico e da eficiência térmica em processos de soldagem.

Utilizando-se dos conceitos propostos por outros autores, conforme a revisão bibliográfica realizada, a partir da análise dos equipamentos desenvolvidos anteriormente foi realizada a proposta de mudanças construtivas para atingir os objetivos. Primeiramente, escolheu-se o material para fabricação do calorímetro, optando-se por utilizar tubulações para condução de água quente, por apresentarem as características desejadas (conforme apresentado no Item 3.2).

O arranjo escolhido para a construção, que pode ser visualizado na Figura 4.1, foi desenvolvido com o auxílio de softwares de desenho computacionais. Esta configuração foi utilizada por apresentar as seguintes características:

- Fácil montagem e desmontagem;
- Sistema compacto;
- Região próxima ao corpo de prova livre de obstáculos para evitar colisões durante a soldagem;
- Ponto de medição de temperatura o mais próximo possível da entrada e da saída de água do corpo de prova;
- Possibilidade de utilizar o calorímetro para medições utilizando corpos de provas tanto na forma de tubos como de chapas;
- Suportes móveis e reguláveis;
- Capacidade de retirada e troca dos sensores de temperatura;
- Regulagem do fluxo de água inicial se mantém constante durante todos os experimentos.

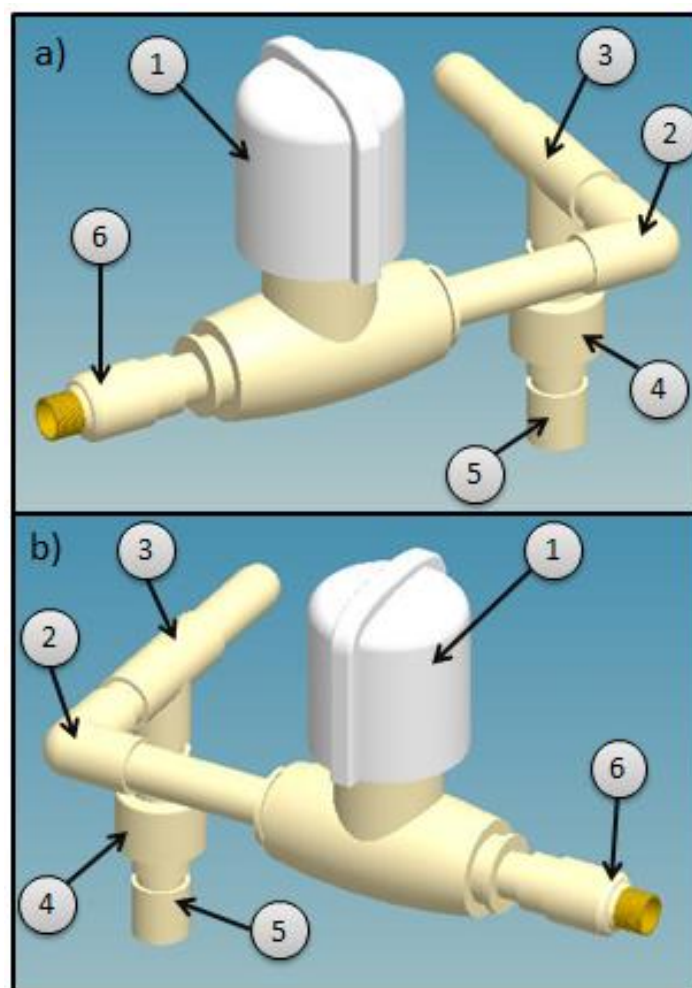


Figura 4.1 – Partes constituintes do corpo do calorímetro: (a) tubulação de entrada de água e (b) tubulação de saída de água. Numeração conforme Tabela 4.1.

Conforme pode ser observado na Figura 4.1, a tubulação de saída é um espelho da tubulação de entrada, utilizando-se os mesmos componentes na fabricação de ambos os lados. Os tubos e conexões utilizados, e suas respectivas quantidades, estão relacionados na Tabela 4.1. Também é possível observar nessa tabela a numeração indicativa de cada um dos componentes, como mostrado na Figura 4.1, excluindo os trechos retos da tubulação. Procurou-se usar o menor trecho reto de tubulação possível, uma vez que os mesmos são necessários para fazer a ligação de uma conexão à outra, visando manter o sistema compacto, leve e com maior rigidez. Na construção do corpo do calorímetro, para junção dos componentes, utilizou-se um adesivo específico para o tipo de material empregado.

Tabela 4.1 – Lista de materiais utilizados na construção do corpo do calorímetro.

Componente	Quantidade	Identificação na Figura 4.1
Tubo Reto	0,5 m	-
Válvula Gaveta	2 un.	1
Joelho 90	2 un.	2
Tê	2 un.	3
União Roscável	2 un.	4
Tampão	2 un.	5
Conector com Rosca 1/2"	2 un.	6

Os suportes para apoio do calorímetro foram projetados para sustentar o sistema em superfícies planas próximas aos equipamentos de soldagem. A utilização dos suportes laterais, que possuem um ajuste de distância por meio de uma barra roscada e porcas, e do suporte central, que possui um sistema para regulagem de altura com a utilização de dois tubos concêntricos presos com um parafuso, é opcional, tendo em vista que pode haver casos em que a própria estrutura do equipamento de soldagem ofereça superfícies para apoio do calorímetro. Na Figura 4.2 é possível observar os suportes construídos e a regulagem disponível neles. Na construção dos apoios foram utilizadas barras chatas de aço ao carbono com largura de 1 1/2" e espessura de 1/8". As estruturas foram montadas utilizando o processo de soldagem MIG/MAG.

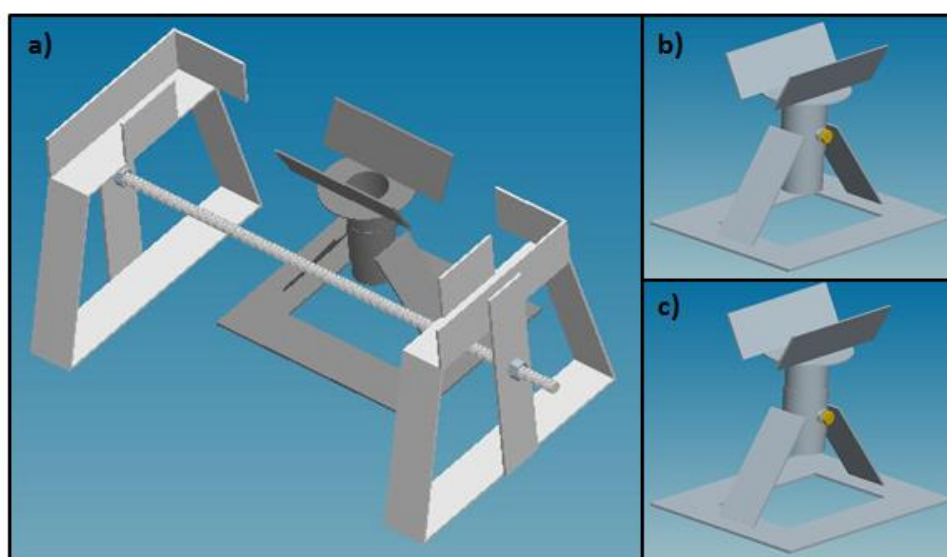


Figura 4.2 – Estruturas construídas para apoiar o calorímetro: (a) suportes laterais e suporte central; (b) e (c) apresentam duas das posições reguláveis do suporte central.

A montagem completa da bancada experimental pode ser observada na Figura 4.3. Este arranjo utiliza os suportes para apoiar a tubulação de entrada e de saída de água, a calha de isolamento inferior, um corpo de prova e as rolhas que ficam na interface do tubo e do corpo do calorímetro.

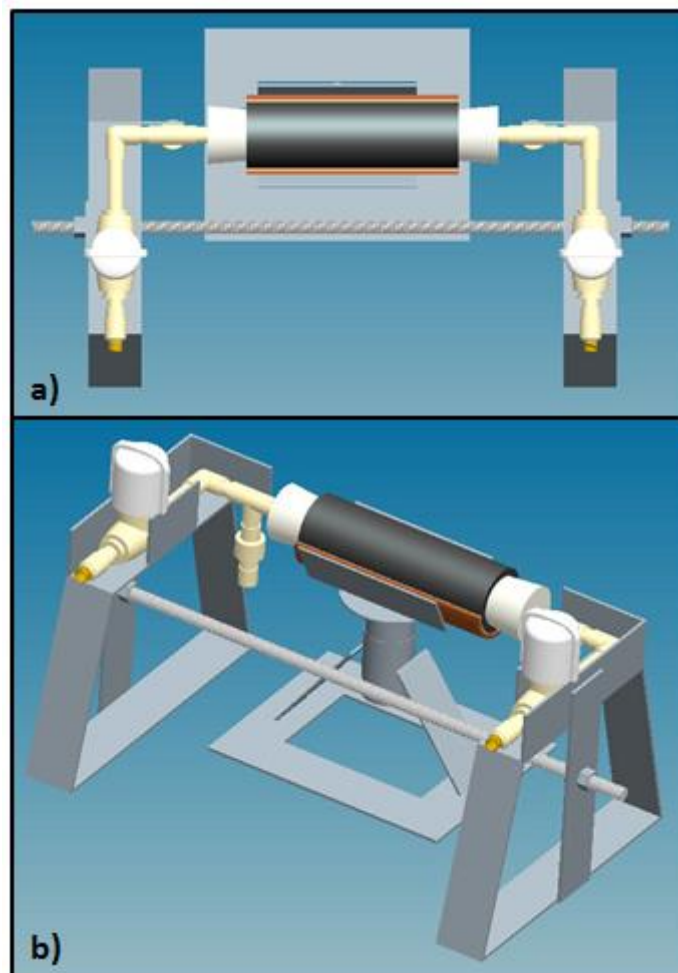


Figura 4.3 – Bancada experimental para os ensaios de calorimetria: (a) vista superior e (b) vista isométrica.

Devido à liberdade de rotação existente na interface entre o tubo de CPVC e a rolha de borracha, diferentes posições e arranjos são possíveis para as tubulações de entrada e saída, conforme pode ser observado na Figura 4.4. Também é possível visualizar nessa figura uma proposta de montagem com o aparato para realizar medições de aporte térmico para chapas metálicas, sendo este melhor detalhado e observado na Figura 4.5.

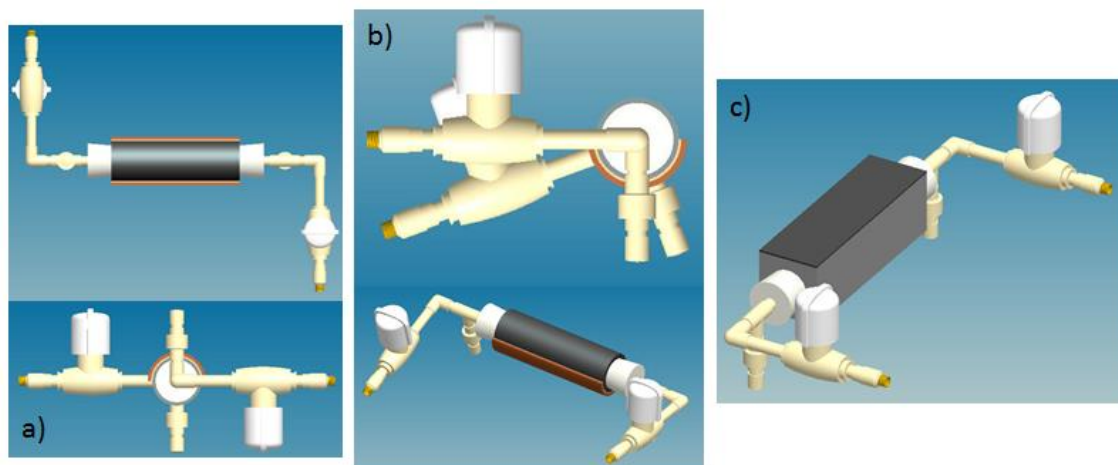


Figura 4.4 – Possíveis configurações do calorímetro: (a) tubulação de entrada oposta à tubulação de saída; (b) tubulação de entrada em ângulo com relação à tubulação de saída e (c) montagem de uma bancada para medição do aporte térmico em chapas metálicas utilizando uma caixa.

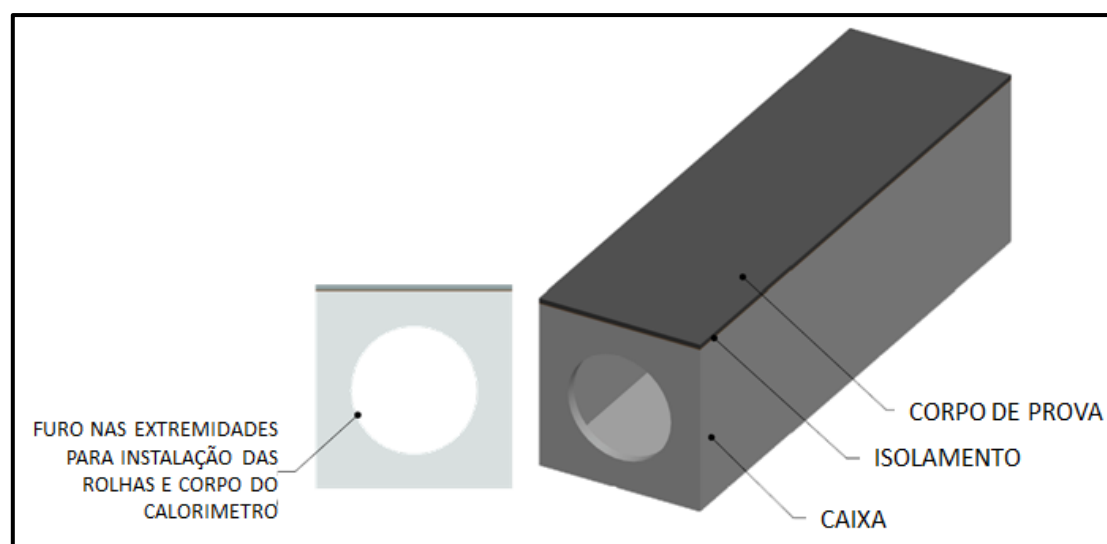


Figura 4.5 – Proposta de caixa para ser utilizada na medição do aporte térmico na soldagem de chapas metálicas.

O fluxograma mostrado na Figura 4.6 apresenta a sequência de passos que deve ser realizada para a correta montagem e preparação do calorímetro para realização dos experimentos. Algumas destas tarefas podem ser visualizadas a partir da Figura 4.7. A correta operação da bancada experimental é essencial para garantir que os resultados obtidos sejam representativos e verdadeiros. A sequência de atividades objetiva a regulagem do fluxo de água desejado, com estanqueidade total no sistema, e a remoção

de ar do interior do calorímetro, uma vez que a presença de ar irá mascarar os resultados.

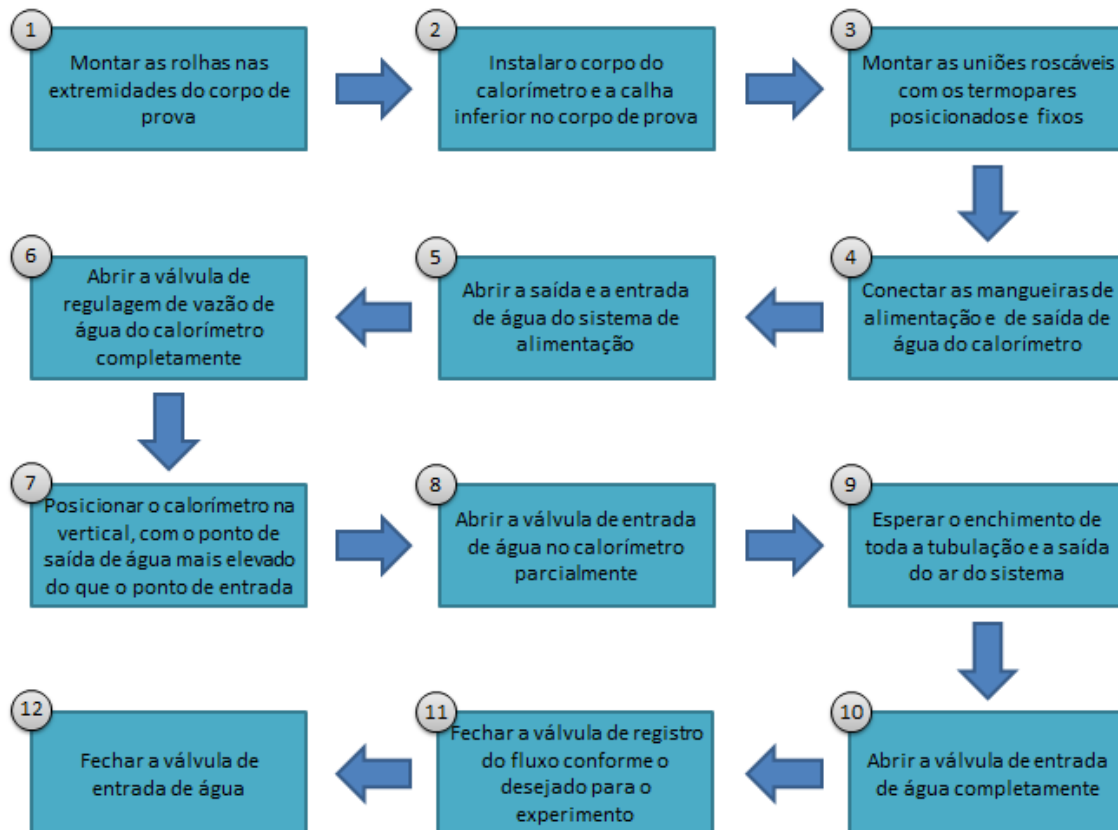


Figura 4.6 – Fluxograma das operações que devem ser realizadas antes do início dos experimentos.



Figura 4.7 – Representação da atividade de número 1.



Figura 4.8 – Segunda atividade a ser realizada na montagem do calorímetro.

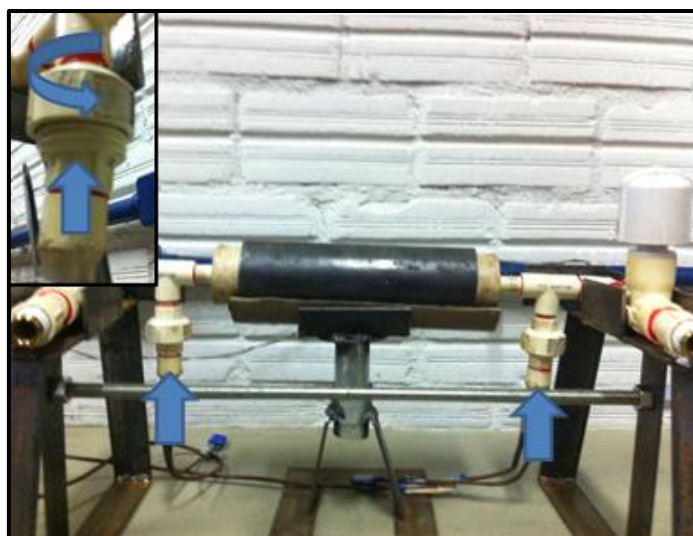


Figura 4.9 – Montagem das uniões roscáveis (passo 3).

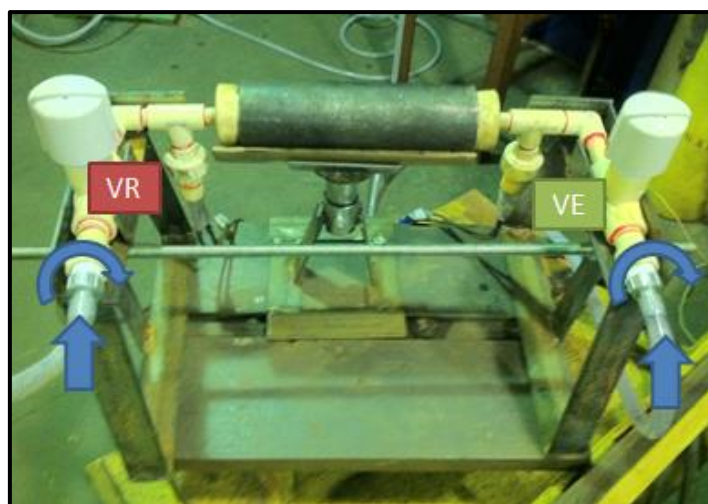


Figura 4.10 – Representação da montagem das mangueiras (passo 4) e indicação da posição das válvulas de entrada de água (VE) e de regulação da vazão (VR) do calorímetro.



Figura 4.11 – Representação da atividade de número 5.



Figura 4.12 – Representação do calorímetro na posição vertical, com o ponto de entrada de água (PEA) em um nível mais baixo que o ponto de saída de água (PSA).

Deve-se ressaltar a importância da realização correta dos passos de número 7, 8 e 9, bem como manter a mangueira de saída de água com parte do seu corpo acima do nível do corpo de prova, como pode ser observado na Figura 4.13. Isto é realizado para evitar que ocorra a entrada de ar no sistema. Deve-se atentar para manter constante a

distância entre o ponto mais elevado da mangueira e a saída da caixa d'água, pois variações nesta altura irão gerar variações na vazão de água que passa pelo calorímetro durante os experimentos.

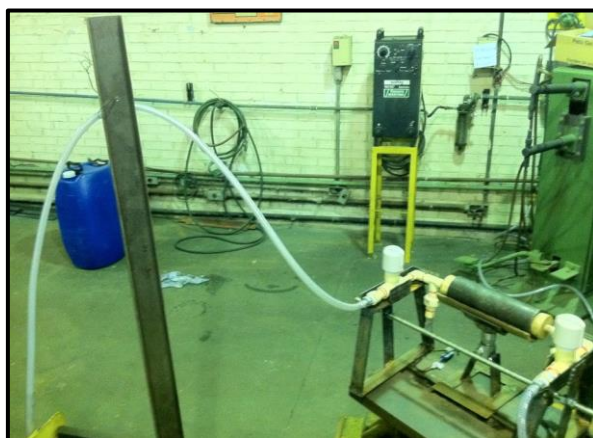


Figura 4.13 – Suporte utilizado para manter parte da mangueira de saída de água mais elevada que o corpo de prova.

A distância em que é mantida a mangueira em relação a caixa d'água deve ser mantida constante durante a realização dos experimentos, pois a variação desta altura resultará em uma diferente

O posicionamento dos termopares é realizado por meio de dois furos existentes em cada um dos tampões. Com o sistema desmontado, deve ser regulada a profundidade dos termopares, visando que eles fiquem com suas pontas (sensores) alinhadas com o centro da tubulação de água, conforme é mostrado na Figura 4.14. Com as posições dos termopares marcadas, deve-se fazer a retirada dos tampões do corpo do calorímetro, que é possível pela separação das partes constituintes das uniões roscáveis.



Figura 4.14 – Alinhamento da ponta dos sensores de temperatura com o centro da tubulação.

Deve-se, então, realizar a fixação dos termopares nos tampões. Para este experimento foi utilizado um adesivo de silicone, visando possibilitar uma futura troca de sensores, conforme pode ser observado na Figura 4.15. Após a fixação das partes é possível realizar o passo 3, descrito anteriormente no fluxograma anteriormente.



Figura 4.15 – Termopares fixos ao tampão com o uso de adesivo de silicone.

Para realizar os experimentos, primeiramente deve-se configurar os parâmetros nos equipamentos de soldagem, conectar os sensores aos sistemas de aquisição de dados, ajustar a distância bico de contato-peça e simular a trajetória de deslocamento da tocha de soldagem. Após a realização destes passos, deve-se realizar a abertura da válvula de entrada de água e, então, já é possível iniciar o processo de soldagem conforme o previsto no planejamento experimental.

Ao fim do cordão de solda, é necessário posicionar a calha superior de isolamento sobre o corpo de prova, protegendo o cordão de solda. Esta atividade deve ser realizada o mais rápido possível, visando evitar a perda de calor do corpo de prova para o ambiente. A retirada da calha e a preparação do sistema para outros experimentos podem ser feitas no momento em que for cessada a aquisição de dados de temperatura, ou seja, quando o corpo de prova e a água atingirem uma condição de equilíbrio térmico. Este procedimento não é necessário para os experimentos realizados com o processo de soldagem ao arco submerso, uma vez que o fluxo de soldagem oferece um certo grau de isolamento térmico ao cordão de solda e a superfície do corpo de prova.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos para o aporte térmico e rendimento térmico com os experimentos planejados no Item 3.13 e uma breve discussão sobre eles. É realizada também uma avaliação do comportamento do calorímetro desenvolvido devido às suas características construtivas. O aporte térmico é apresentado por unidade de comprimento do cordão de solda utilizando-se a variável Q_{imp} , em J/mm, para facilitar a comparação com a energia de soldagem. A corrente e a tensão de soldagem são apresentadas pelos seus valores médios (I_m e U_m , respectivamente). Também é calculado o calor imposto médio (Q_m) e o rendimento térmico médio (η_m) para cada experimento realizado.

5.1 Experimentos com o Processo de Soldagem GMAW

O primeiro processo de soldagem utilizado para avaliar o funcionamento do calorímetro foi o MIG/MAG. Os resultados obtidos para a energia de soldagem, para o calor aportado e para o rendimento térmico, em seus valores médios para cada ensaio, podem ser visualizados na Figura 5.1. Na Tabela 5.1, além dos valores médios, são também apresentados os parâmetros de soldagem monitorados para os cordões de solda realizados.

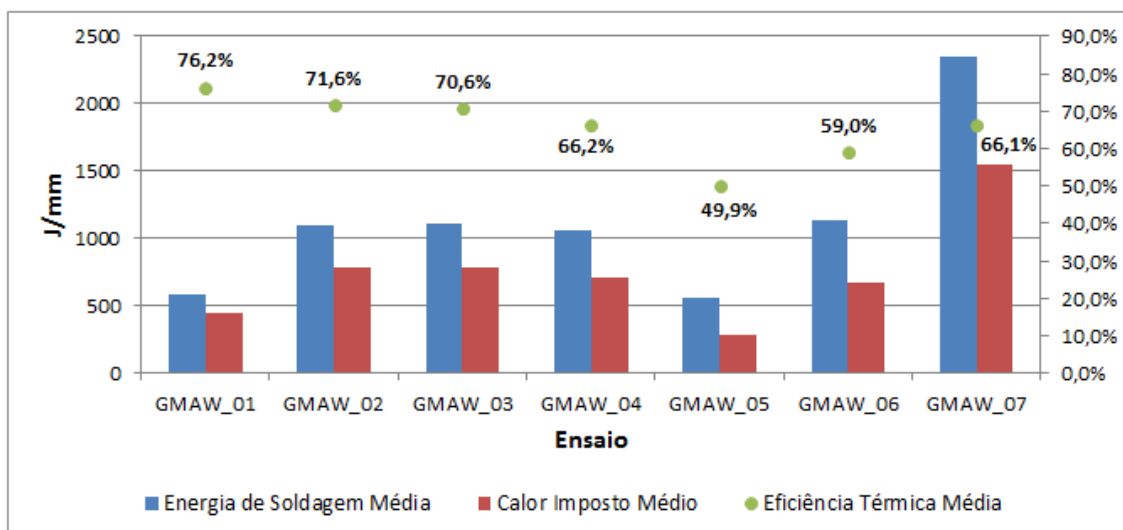


Figura 5.1 – Resultados obtidos nos ensaios com o processo GMAW.

Tabela 5.1 – Tabela de resultados dos experimentos realizados com o processo de soldagem GMAW.

Ensaio	Cordão de solda	U_m [V]	I_m [A]	\bar{P}_{inst} [W]	v_a [m/min]	t_s [s]	L_c [mm]	E_s [J/mm]	Q_{imp} [J/mm]	η	Q_m [J/mm]	η_m
	GMAW_01_1	21,4	145	3020	2,8	29,9	149,5	604,0	454,75	75,29%		
GMAW_01	GMAW_01_2	21,5	136	2874	2,9	30,0	150,0	574,8	445,54	77,51%	446,04	76,26%
	GMAW_01_3	21,5	136	2881	2,9	29,9	149,5	576,2	437,83	75,99%		
	GMAW_02_1	21,8	263	5564	7,7	29,9	149,5	1112,8	772,89	69,45%		
GMAW_02	GMAW_02_2	21,8	255	5486	7,7	29,9	149,5	1097,2	784,25	71,48%	784,97	71,60%
	GMAW_02_3	21,7	252	5399	7,7	30,0	150,0	1079,8	797,76	73,88%		
	GMAW_03_1	32,5	343	11169	11,9	15,1	151,0	1116,9	777,05	69,57%		
GMAW_03	GMAW_03_2	32,4	330	10715	11,9	15,1	151,0	1071,5	753,59	70,33%	779,78	70,60%
	GMAW_03_3	32,5	347	11250	11,9	14,9	149,0	1125,0	808,70	71,88%		
	GMAW_04_1	21,7	241	5250	7,7	29,9	149,5	1050,0	720,81	68,65%		
GMAW_04	GMAW_04_2	21,7	252	5407	7,7	29,8	149,0	1081,4	711,18	65,76%	702,91	66,19%
	GMAW_04_3	21,7	242	5274	7,7	29,9	149,5	1054,8	676,74	64,16%		
	GMAW_05_1	21,4	132	2795	2,9	29,9	149,5	559,0	287,08	51,36%		
GMAW_05	GMAW_05_2	21,5	131	2775	2,9	29,9	149,5	555,0	269,14	48,49%	278,11	49,93%
	GMAW_06_1	32,6	355	11568	11,9	15,0	150,0	1156,8	683,41	59,08%		
GMAW_06	GMAW_06_2	32,5	342	11113	11,9	15,1	151,0	1111,3	654,95	58,94%	669,18	59,01%
	GMAW_07_1	32,7	360	11751	12,4	29,9	149,5	2350,2	1466,62	62,40%		
GMAW_07	GMAW_07_2	32,7	359	11717	12,4	30,0	150,0	2343,4	1636,59	69,84%	1551,60	66,12%

Analisando os resultados obtidos para os ensaios GMAW_01, GMAW_02 e GMAW_03, observa-se um rendimento térmico médio de 72,82%, com valores extremos de 69,45% (cordão de solda GMAW_02_1) e 77,51% (cordão de solda GMAW_01_2). Os outros experimentos realizados não foram considerados nestes cálculos por razões que serão discutidas no decorrer deste Capítulo. Comparando estes valores com estudos realizados anteriormente, podemos observar que eles foram ligeiramente inferiores aos resultados globais obtidos por outros autores. Essers e Walter, 1981, obtiveram uma eficiência térmica média de 71%, já Tusek e Suban, 2000, chegaram a valores médios de 77% e Arévalo, 2011 observou uma eficiência global média de 76,2%. Outros autores (Bosworth, 1991; DuPont e Marder, 1995) obtiveram rendimentos térmicos mais elevados, sendo estes maiores do que 80%.

Uma análise interessante quando se utiliza o processo de soldagem MIG/MAG é avaliar o rendimento do arco de acordo com o tipo de transferência metálica obtido

durante a soldagem. Conforme Machado, 1996, a transferência por curto-circuito ocorre com baixa tensão de soldagem, normalmente entre 15 V e 22 V. Já os modos de transferência globular e aerossol ocorrem com maiores tensões do que o modo anterior. Analisando os gráficos de tensão e corrente de soldagem dos ensaios realizados, verificou-se que nos experimentos GMAW_01 e GMAW_02, a transferência metálica foi por curto-circuito, enquanto que no ensaio GMAW_03 o modo de transferência foi o aerossol.

Assim, tem-se que para o processo de soldagem GMAW curto-circuito a eficiência média foi de 73,93%, enquanto que no processo GMAW aerossol, este valor foi de 71,1%. O resultado obtido para a transferência metálica por curto-circuito foi consideravelmente inferior a observada por outros autores, como Arévalo, 2011, que obteve um rendimento térmico de 79,4% para os processo GMAW curto-circuito utilizando um calorímetro de N₂L. As razões pelas quais o modo de transferência aerossol apresenta menor rendimento do arco que o modo curto-circuito são atribuídas aos seguintes fatos:

- A transferência metálica por curto-circuito ocorre com um arco mais curto, logo, as perdas pelos mecanismos de transferência de calor são menores neste modo;
- No processo GMAW aerossol ocorre um aumento no comprimento do arco, que por sua vez gera um incremento na tensão de soldagem e aumenta também a potência consumida. Porém, esse aumento da potência (necessária para manter o arco elétrico estável) não resulta, efetivamente, em aumento na quantidade de calor aportado a peça.

Comparando os GMAW_01 e GMAW_02, onde manteve-se a mesma tensão de soldagem e aumentou-se a velocidade de alimentação do arame, que conseqüentemente aumenta a corrente de soldagem, observa-se uma redução na eficiência térmica. Para o experimento GMAW_01 obteve-se uma eficiência térmica média de 76,26%, enquanto que no ensaio GMAW_02 este valor foi de 71,60%, o que representa uma redução de aproximadamente 6,11% no rendimento do arco elétrico. Esta diferença entre os valores obtidos pode ser atribuída ao aumento das perdas de calor que ocorrem devido à radiação, convecção, vapores metálicos e respingos durante a soldagem com correntes maiores.

5.1.1 Efeito da Utilização das Calhas de Isolamento Térmico

Comparando os resultados obtidos entre os experimentos GMAW_02 e GMAW_04, apresentados na Tabela 5.1, é possível verificar que houve uma redução no aporte térmico médio e na eficiência térmica média obtida quando não foram utilizadas as calhas de isolamento térmico durante a soldagem.

Com os mesmos parâmetros de soldagem (tensão, corrente e velocidade de soldagem), para uma energia de soldagem da ordem de 1 kJ/mm, utilizando-se as calhas de isolamento a energia média entregue ao corpo de prova foi de 784,97 J/mm e a eficiência média do arco foi de 71,6%, enquanto que, sem a utilização das calhas, estes valores foram de 702,91 J/mm e 66,19%, respectivamente. Isso representa uma redução de aproximadamente 10% no valor obtido para o calor aportado e de 8% no valor da eficiência térmica. O calor que é dissipado para a vizinhança não é percebido pelo calorímetro, e por isso observamos valores menores para a energia aportada e para o rendimento do arco. Portanto, verifica-se que as perdas de calor para o ambiente são importantes e devem ser minimizadas quando é utilizado calorimetria para realizar a avaliação destas características dos processos de soldagem.

5.1.2 Efeito da Espessura do Corpo de Prova

Quando analisa-se o ensaio GMAW_01 em comparação com o GMAW_05 e quando comparamos o ensaio GMAW_03 com o experimento GMAW_06, verifica-se a influência da espessura do corpo de prova nos resultados. É possível observar que o tubo de maior diâmetro e maior espessura de parede apresentou valores significativamente menores do que aqueles obtidos com o corpo de prova de menor espessura, tanto para o calor aportado como para eficiência térmica com um mesmo nível de energia de soldagem e mesmos parâmetros da fonte.

Utilizando uma energia de soldagem em torno de 550 J/mm, com o experimento GMAW_05, no qual é utilizado o corpo de prova mais espesso, obteve-se uma energia aportada média para peça de 278,11 J/mm e um rendimento médio do arco de 49,93%. Utilizando os mesmos parâmetros de soldagem do ensaio GMAW_05, porém com o tubo de menor espessura, no experimento GMAW_01, obteve-se um calor médio aportado de 446,04 J/mm e um rendimento térmico médio de 76,26%. Isto representa

que se mediu uma diferença de aproximadamente 38% no valor da energia aportada e de 35% para o rendimento térmico entre os resultados com os dois diferentes corpos de prova. A discrepância entre os resultados também é observada entre os ensaios GMAW_03 e GMAW_06, onde utilizou-se uma energia de soldagem de 1000 J/mm. Neste caso, a diferença entre os valores foi menor, sendo que para o calor aportado médio foi de 14% e para o rendimento térmico médio de 16%.

Esta diferença existente entre os resultados dos ensaios pode ser atribuída à inércia térmica do corpo de prova com maior espessura (maior massa), ou seja, o tubo necessita de um maior período de tempo para entrar em equilíbrio térmico e o gradiente de temperatura ao longo da espessura do tubo é maior neste caso. Nesta condição, tem-se uma temperatura menor na interface entre corpo de prova e a água que passa pelo seu interior, o que, conseqüentemente, leva a uma elevação menor na temperatura da água quando comparado ao tubo com espessura de parede menor. Na Figura 5.2 pode ser observado o gráfico da diferença de temperatura da água para os cordões de solda GMAW_01_1 e GMAW_05_1, dos experimentos GMAW_01 e GMAW_05, respectivamente.

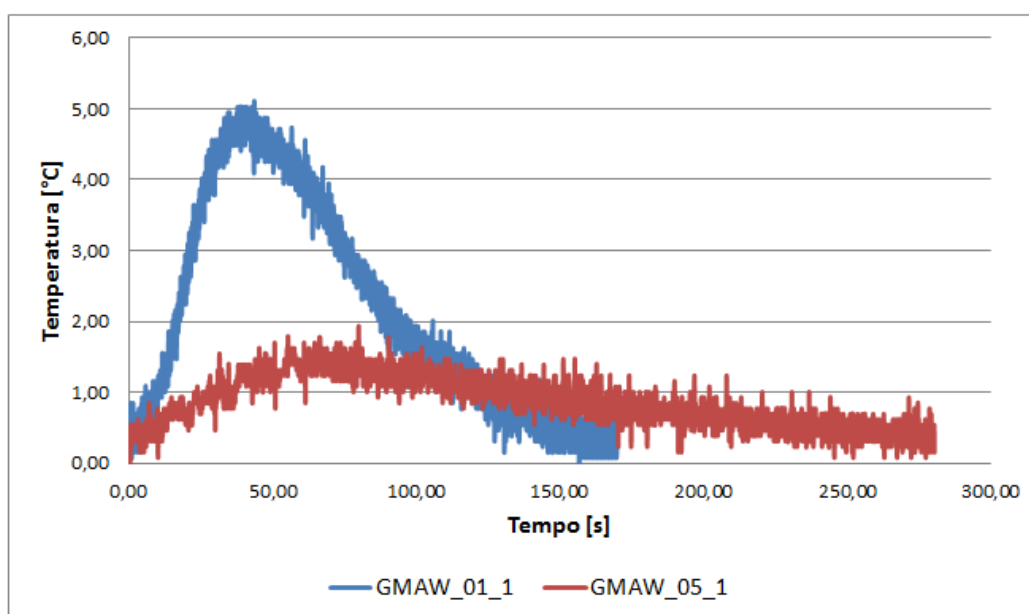


Figura 5.2 – Gráfico de temperatura dos cordões de solda GMAW_01_1 e GMAW_05_1.

Na Figura 5.2 pode visualizar-se a declividade da curva de aquecimento e resfriamento da água é muito menor para o tubo com maior espessura do que para o

tubo com menor espessura, evidenciando o efeito térmico mencionado anteriormente. A metodologia adotada para este trabalho estabelece que os ensaios sejam finalizados quando a diferença entre a temperatura da água na entrada e na saída do calorímetro é menor do que metade do erro do instrumento de medição durante um período de 20 segundos, portanto, acredita-se que parte da energia acumulada pelo corpo de prova mais espesso acabou não sendo computada nos cálculos.

O experimento GMAW_07 foi realizado com uma energia de soldagem maior, sendo de aproximadamente 1500 J/mm. A eficiência térmica média obtida neste ensaio foi de 66,12%, que é menor do que o rendimento de arco encontrado para o processo de soldagem GMAW aerossol com o tubo de menor diâmetro.

5.2 Experimentos com o Processo de Soldagem GTAW

Segundo o previsto no planejamento experimental para o processo de soldagem GTAW (3.13.2), seriam realizados experimentos com o corpo de prova de maior diâmetro (GTAW_05 e GTAW_06), porém, devido aos resultados observados e discutidos no Item anterior, estes ensaios não foram realizados. Na Figura 5.3 e na Tabela 5.2 são apresentados os resultados obtidos nos experimentos executados.

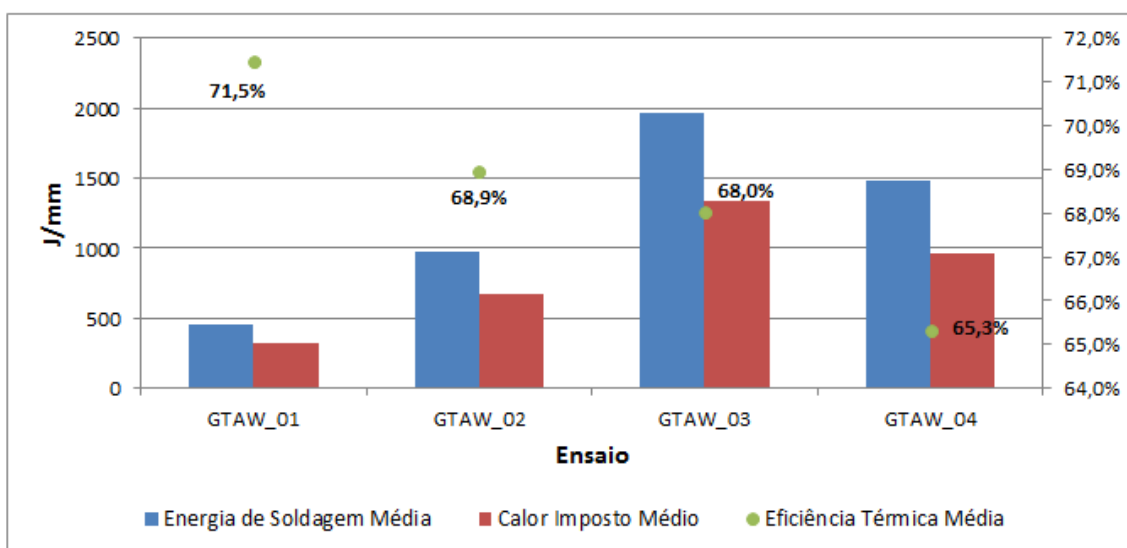


Figura 5.3 – Resultados obtidos nos ensaios com o processo GTAW.

Tabela 5.2 – Tabela de resultados dos experimentos realizados com o processo de soldagem GTAW.

Ensaio	Cordão de solda	U_m [V]	I_m [A]	\bar{P}_{inst} [W]	t_s [s]	L_c [mm]	E_s [J/mm]	Q_{imp} [J/mm]	η	Q_m [J/mm]	η_m
	GTAW_01_1	11,5	201	2313	23,3	116,5	462,6	334,60	72,33%		
GTAW_01	GTAW_01_2	11,2	200	2251	21,5	107,5	450,2	311,24	69,13%	327,86	71,45%
	GTAW_01_3	11,5	201	2317	21,3	106,5	463,4	337,74	72,88%		
	GTAW_02_1	12,2	202	2371	76,6	191,5	948,4	658,35	69,42%		
GTAW_02	GTAW_02_2	12,3	202	2502	75,1	187,8	1000,8	685,50	68,50%	671,93	68,96%
	GTAW_02_3	12,1	201	2415	76,8	192,0	966,0	-	-		
	GTAW_03_1	12,0	201	2476	41,2	51,5	1980,8	1347,23	68,01%		
GTAW_03	GTAW_03_2	12,2	200	2466	39,8	49,8	1972,8	1359,42	68,91%	1339,25	68,04%
	GTAW_03_3	12,1	200	2439	42,2	52,8	1951,2	1311,10	67,19%		
	GTAW_04_1	14,1	262	3794	44,4	111,0	1517,6	978,875	64,50%		
GTAW_04	GTAW_04_2	13,3	261	3468	43,3	108,3	1387,2	-	-	965,47	65,33%
	GTAW_04_3	13,8	262	3598	46,4	116,0	1439,2	952,069	66,15%		

Observa-se na Tabela 5.2 que para os cordões de solda GTAW_02_3 e GTAW_04_2 não foram calculados o calor aportado à peça e o rendimento térmico do processo, isto porque ocorreram interferências elétricas durante a soldagem e os sinais de aquisição de temperatura apresentaram muitas perturbações. Tal fato pode ser evidenciado na Figura 5.4. A ocorrência desse fenômeno foi atribuída à presença de carga elétrica percebida durante os experimentos no sistema de movimentação da tocha de soldagem (Tartílope v4).

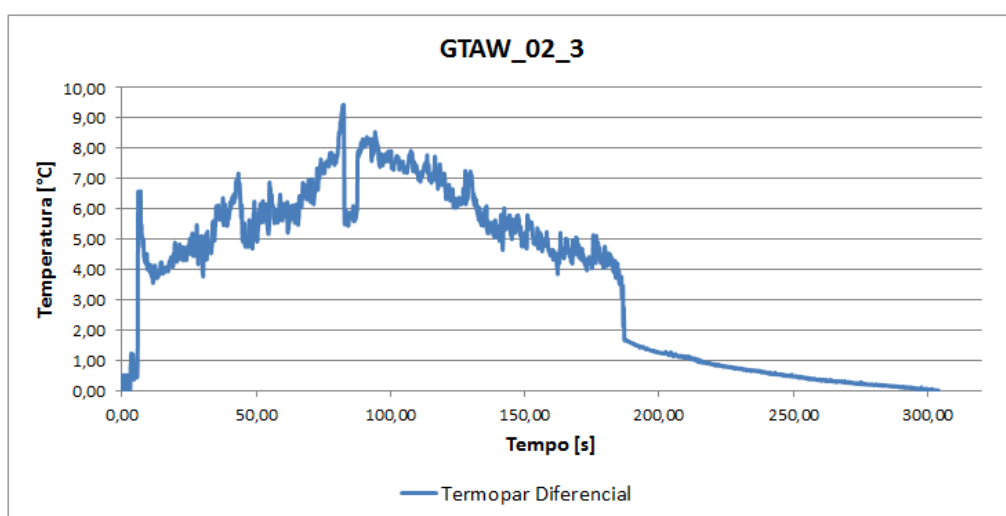


Figura 5.4 – Gráfico da temperatura obtida para o cordão de solda GTAW_02_3.

Para os ensaios propostos neste trabalho, observou-se uma eficiência térmica média de 68,44%, sendo o valor máximo de 72,88% e o mínimo de 64,5%. Estes valores ocorreram nos cordões de solda GTAW_01_3 e GTAW_04_1, respectivamente. Os resultados obtidos são muito próximos aos apresentados por autores que utilizaram corpos de prova de aço ao carbono. Ghent et al., 1979, obtiveram uma eficiência média de 71%, DuPont e Marder, 1995, reportaram um rendimento térmico médio de 67% e Arévalo, 2011, chegou, com os seus experimentos, a um rendimento médio do arco de 70%. Porém, os resultados que foram obtidos neste trabalho são inferiores aos reportados em trabalhos que utilizaram corpos de prova de alumínio ou aço inoxidável, por exemplo. Cantin e Francis, 2005, obtiveram valores médios de 83% na soldagem TIG de alumínio e Giedt et al., 1989, realizaram a soldagem em aço inoxidável 304L e chegaram a um rendimento médio do arco de 82%. Esta diferença entre os resultados demonstra que o material base influencia diretamente na transferência de calor à peça durante a soldagem.

Conforme pode-se visualizar na Tabela 5.2, mantendo a distância da ponta do eletrodo à peça e a corrente de soldagem constantes, e alterando apenas a velocidade de soldagem, observa-se uma redução na eficiência térmica do processo para velocidades de soldagem menores. Este decréscimo foi mais acentuado no momento em que se reduziu a velocidade de 5 mm/s para 2,5 mm/s, do que quando mudou-se de 2,5 mm/s para 1,25 mm/s. Fuerschbach e Knorovsky, 1991, observaram uma redução no rendimento térmico do processo para velocidades baixas (abaixo de 10 mm/s), porém não verificaram variações nos resultados para uma faixa de 10 mm/s a 21 mm/s. Os autores atribuíram a redução nos valores de eficiência do arco ao aumento de tensão ocorrido durante a soldagem com baixas velocidades. No estudo realizado por Smartt et al., 1985, eles também verificaram que o rendimento do arco no processo de soldagem GTAW decresce com o aumento da tensão.

A diferença nos resultados observada entre os ensaios com velocidades de 5 mm/s e 2,5 mm/s pode ser atribuída ao fato já observado por Fuerschbach e Knorovsky, 1991, e Smartt et al., 1985, pois conforme pode-se observar na Tabela 5.2 ocorreu um aumento na tensão de soldagem entre os experimentos GTAW_01 e GTAW_02. A pequena variação observada entre os ensaios com velocidades de soldagem de 2,5 mm/s e 1,25 mm/s pode estar relacionada com o fato de ter-se uma maior fusão de material, ou seja, tem-se um aumento na superfície do cordão de solda,

portanto, entende-se que as perdas de calor para o ambiente vizinho também aumentam, e esta energia também não é captada pelo calorímetro durante a soldagem enquanto não é colocada a calha de isolamento térmico.

Comparando o GTAW_03 com o GTAW_02, percebe-se que o primeiro ensaio tem um tempo de soldagem aproximadamente duas vezes maior do que o segundo. Portanto, o corpo de prova fica exposto ao ambiente por um maior período de tempo quando se utiliza velocidades de soldagem menores para o mesmo comprimento de cordão e, conseqüentemente, tem-se uma maior perda de calor pelos mecanismos de radiação e convecção. Entende-se que este efeito complementa o citado anteriormente, contribuindo no aumento das perdas de calor, o que leva a uma pequena diferença nos resultados obtidos para o rendimento térmico.

Analisando os ensaios GTAW_02 e GTAW_04, em que, mantendo-se os parâmetros de soldagem constantes e alterando apenas a corrente de soldagem, observou-se um menor rendimento do arco para uma maior corrente de soldagem. Este efeito também foi reportado por Niles e Jackson, 1975 e Arévalo, 2011. Devido à característica estática da fonte, o aumento da corrente de soldagem faz com que a tensão de soldagem também aumente. No experimento GTAW_02, a tensão média foi de 11,4 V, enquanto no ensaio GTAW_04, esta foi de 13,7 V e a diferença entre os rendimentos do arco nos dois processos foi de aproximadamente 9%. Portanto, o aumento da corrente de soldagem influi negativamente na eficiência térmica do processo de soldagem TIG.

5.3 Experimentos com o Processo de Soldagem SAW

Devido à diferença existente entre a indicação da escala dos potenciômetros de regulagem dos parâmetros de soldagem do equipamento e os valores verdadeiros obtidos durante a soldagem, e também pela dificuldade em se realizar uma solda estável com baixas energias de soldagem, não foi possível realizar os experimentos propostos inicialmente conforme a Tabela 3.11. Foram realizados cordões de solda com outros corpos de provas para determinação dos experimentos possíveis de serem realizados.

Seguindo a mesma variação de parâmetros proposta no planejamento experimental, os experimentos definidos para serem realizados são apresentados na Tabela 5.3. Assim como no caso da soldagem com o processo GTAW, também não

foram realizados os ensaios com os corpos de prova de maior diâmetro, uma vez que os resultados obtidos com estes CP não foram satisfatórios.

Tabela 5.3 – Experimentos realizados com o processo de soldagem SAW.

Ensaio	U [V]	v_a [m/min]	v_s [mm/s]	Diâmetro do CP [mm]
SAW_11	40	2,9	7,5	63,5
SAW_12	40	4,0	7,5	63,5
SAW_13	45	4,0	7,5	63,5
SAW_14	45	4,0	6,0	63,5

A energia de soldagem média, o calor aportado médio e o rendimento térmico médio para os novos experimentos propostos podem ser visualizados na Figura 5.5 e, na Tabela 5.4, são apresentados os resultados obtidos. Durante os experimentos não foi possível realizar a aquisição da velocidade de alimentação do arame-eletrodo pelo fato deste apresentar oxidação superficial e pela ausência de um local seguro para fixação do sensor.

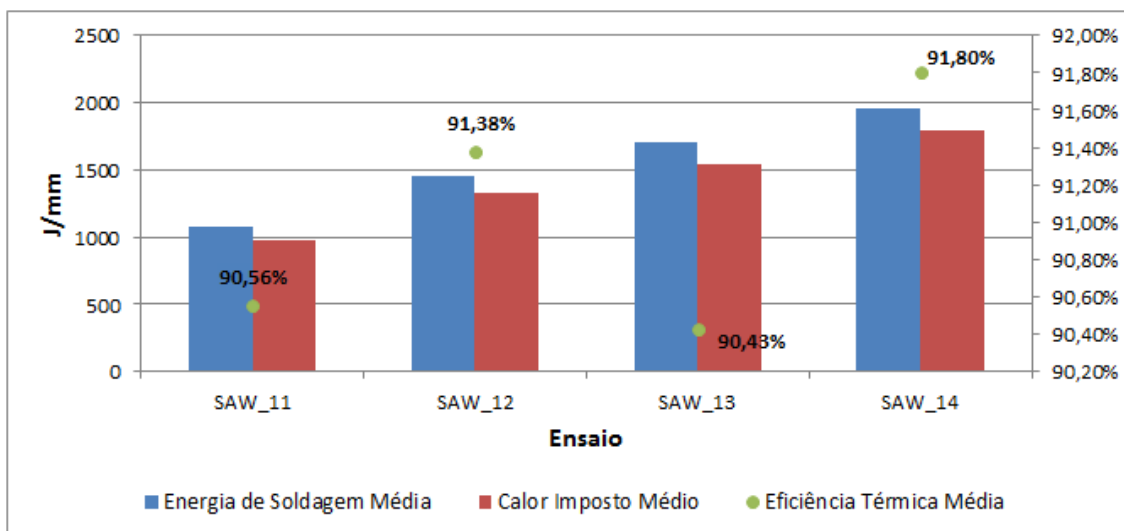


Figura 5.5 – Resultados obtidos nos ensaios com o processo SAW.

Tabela 5.4 – Tabela de resultados dos experimentos realizados com o processo de soldagem SAW.

Ensaio	Cordão de solda	U_m [V]	I_m [A]	\bar{P}_{inst} [W]	t_s [s]	L_c [mm]	E_s [J/mm]	Q_{imp} [J/mm]	η	Q_m [J/mm]	η_m
	SAW_11_1	40,2	192	7688	15,2	114,00	1025,1	922,44	89,99%		
SAW_11	SAW_11_2	40,9	204	8287	17,3	129,75	1104,9	996,50	90,19%	971,17	90,56%
	SAW_11_3	41,0	200	8155	15,5	116,25	1087,3	994,59	91,47%		
	SAW_12_1	39,8	285	11277	16,7	125,25	1503,6	1360,54	90,49%		
SAW_12	SAW_12_2	40,4	256	10296	16,1	120,75	1372,8	1271,83	92,64%	1326,27	91,38%
	SAW_12_3	39,5	282	11083	17,4	130,50	1477,7	1346,44	91,12%		
	SAW_13_1	45,4	287	12958	15,8	118,50	1727,7	1572,15	90,99%		
SAW_13	SAW_13_2	45,4	279	12599	15,4	115,50	1679,9	1507,56	89,74%	1537,19	90,43%
	SAW_13_3	45,0	283	12691	16,9	126,75	1692,1	1531,85	90,53%		
	SAW_14_1	44,6	265	11745	23,0	138,00	1957,5	1797,07	91,80%		
SAW_14	SAW_14_2	45,5	257	11557	21,8	130,80	1926,2	-	-	1797,07	91,80%
	SAW_14_3	-	-	-	-	-	-	-	-		

Observando os resultados obtidos nos ensaios, verifica-se que, para os cordões de solda SAW_14_1 e SAW_14_2, não são apresentados valores para o calor imposto nem para o rendimento térmico. Isto se deve ao fato de que, durante a realização do cordão SAW_14_1, ocorreu perfuração do corpo de prova, comprometendo o experimento. Optou-se por não realizar o cordão SAW_14_2 por questões de segurança e integridade das pessoas e equipamentos.

Conforme os dados apresentados na Tabela 5.4, pode-se observar uma eficiência térmica média entre os experimentos propostos de 91,05%, sendo o maior rendimento do arco de 92,64% (cordão de solda SAW_12_2) e o menor de 89,74% (cordão SAW_13_2). Estes valores são ligeiramente superiores aos valores reportados por DuPont e Marder, 1995, que verificaram uma eficiência térmica entre 83% e 90%, e Fuerschbach, 2004, que aconselha a utilização de uma eficiência de 90% para este processo de soldagem.

A eficiência térmica do processo de soldagem ao arco submerso é maior do que a do processo MIG/MAG e TIG e isto se deve ao fato do arco elétrico estar protegido durante a realização do cordão de solda, diminuindo as perdas para o ambiente e aumentando o calor imposto no corpo de prova. Analisando os diferentes ensaios propostos, não foi observada nenhuma diferença significativa nos resultados obtidos

para o rendimento do arco do processo SAW mantendo-se os todos os parâmetros de soldagem constantes e variando apenas a tensão de soldagem, a corrente de soldagem ou a velocidade de deslocamento independentemente. Recomenda-se a realização de um projeto de experimentos para identificar a real importância de cada uma destas variáveis do processo na eficiência térmica.

5.4 Análise dos Erros e Incertezas

Tanto na avaliação da energia de soldagem, quanto do calor aportado à peça, bem como do rendimento térmico dos processos de soldagem, não é possível realizar a medição direta destas variáveis, sendo necessária a obtenção indireta destes pelo monitoramento de outros parâmetros, como a corrente de soldagem e a temperatura da água. Ainda que se utilizem os melhores equipamentos disponíveis e se tenha o maior cuidado possível durante a medição das variáveis dos experimentos, a ocorrência de erros aleatórios é inerente ao processo de medição.

Na Tabela 5.5 são apresentados os erros dos valores lidos nos instrumentos de medição (sensores), utilizados durante os experimentos, conforme o encontrado em catálogos e manuais dos seus fabricantes. Porém, não foi possível obter estes dados para todos os equipamentos. Além deste fato, o sistema de medição de vazão de água é totalmente dependente do operador e os equipamentos utilizados não possuem nenhum tipo de calibração ou certificação, portanto os valores medidos são subjetivos e os erros associados a eles não puderam ser determinados.

Por esses motivos, estima-se que a incerteza neste trabalho é equivalente à reportada por outros autores. Stenbacka et al., 2012, que realizaram uma compilação de diversos estudos, sugerem que o erro na avaliação da eficiência térmica dos processos de soldagem com o uso de calorimetria seja da ordem de 10%.

Tabela 5.5 – Erro de leitura dos sensores.

Sensor	Variável, Unidade	Erro (valor lido)
Alicate amperímetro	Corrente, A	2%
Voltímetro	Tensão, V	1%
Tacômetro de pulsos	Velocidade de alimentação, m/min	2%
Termopar tipo T	Temperatura, °C	1%

5.5 Análise Financeira

Um dos objetivos deste trabalho é a construção de um calorímetro de fluxo contínuo de água que seja de baixo custo. Portanto, foi realizado um levantamento das despesas associadas com o desenvolvimento da bancada experimental apresentada neste trabalho. Para tal análise, foram divididos os custos entre três grupos: calorímetro, sensores e sistema de alimentação de água. Não foram contabilizados nos custos totais os gastos com materiais indiretos como colas, adesivos, lixas, serras e consumíveis de soldagem utilizados, devido à dificuldade na determinação exata do consumo de cada material e também pelo fato de muitos deles estarem disponíveis no laboratório de soldagem. Também não foram considerados os gastos com mão-de-obra, pois toda a construção do calorímetro foi realizada pelo próprio autor.

O grupo calorímetro engloba as despesas relacionadas com a construção do corpo do calorímetro, dos suportes laterais, suporte central e das calhas de isolamento. Os custos associados com materiais diretos deste grupo totalizaram R\$ 263,00, sendo R\$ 172,00 em materiais hidráulicos (tubos, registros e conexões de CPVC), R\$ 34,00 em material metálico (barras chatas, barra roscada, porcas e parafuso) e R\$ 57,00 com outros materiais (cortiça, rolhas de borracha e tubos de PVC).

Os gastos com sensores incluem a compra dos termopares, de cabos de extensão para eles e o balde milimetrado utilizado na medição da vazão de água. O custo despendido na aquisição destes materiais foi de R\$ 361,00. Por último, tem-se as despesas associadas com o sistema de alimentação de água (caixa de água, torneira boia, tubos e conexões de PVC, válvulas e mangueiras) que totalizaram a importância de R\$ 188,00.

Ao todo, foram gastos R\$ 812,00 na bancada experimental deste trabalho, sendo mais de 40% deste valor despendido na aquisição dos sensores de temperatura. Não foi possível realizar uma comparação entre o custo total desta bancada com os dispositivos desenvolvidos por outros autores, pois nenhum destes realizou uma análise financeira dos seus equipamentos. Porém, analisando os materiais aplicados na construção de diferentes calorímetros, entende-se que o valor gasto na proposta deste trabalho é relativamente baixo.

6 CONCLUSÕES

Nesta Dissertação objetivou-se construir e validar um calorímetro com uma vazão de água constante para a avaliação da eficiência térmica em processos de soldagem a arco elétrico. Foi proposto que ele fosse de simples operação, de fácil movimentação, que fosse adaptável aos diferentes processos e que o custo de construção do equipamento fosse baixo. Acerca dos resultados obtidos nesta Dissertação são feitos os seguintes comentários finais:

- O calorímetro construído atende os objetivos gerais propostos nesta Dissertação;
- A espessura do corpo de prova influencia diretamente nos resultados obtidos conforme os parâmetros de soldagem utilizados e a metodologia adotada;
- O uso das calhas de isolamento se faz necessário durante os ensaios para evitar a transferência de calor do corpo de prova para o ambiente vizinho;
- Os resultados obtidos para a eficiência térmica dos processos de soldagem apresentaram uma boa repetitividade, sendo que a maior diferença observada entre cordões de solda de um mesmo experimento foi de 4,5% (ensaio GMAW_04);
- Para o processo de soldagem GMAW, obteve-se um rendimento térmico médio entre os experimentos realizados de 72,82%;
- O modo de transferência metálica influencia diretamente no fluxo de calor durante processo de soldagem GMAW, sendo que para o modo curto-circuito a eficiência média é maior do que para o modo aerossol;
- Para os parâmetros de soldagem propostos para os ensaios com o processo GTAW, foi observada uma eficiência térmica média de 68,44%;
- O aumento da corrente de soldagem no processo de soldagem GTAW influencia negativamente na eficiência térmica;
- O aumento somente na corrente de soldagem no processo de soldagem GTAW não tem influência no rendimento do arco;
- Nos experimentos propostos para o processo de soldagem ao arco submerso foi observada uma eficiência térmica média de 91,05%;
- Não foi verificada nenhuma diferença significativa nos resultados obtidos para o rendimento do arco do processo SAW com a variação dos parâmetros de soldagem proposta.

7 TRABALHOS FUTUROS

Complementando os aspectos abordados nesta Dissertação e visando a continuidade dos estudos na área de investigação da eficiência térmica dos processos de soldagem, cita-se os itens a seguir como perspectivas de futuros trabalhos:

- Realizar um projeto de experimentos para verificar a influência e a significância de um maior número de parâmetros de soldagem no aporte térmico e na eficiência térmica dos processos;
- Investigar os efeitos nos resultados com o uso de corpos de prova de diferentes materiais, como o aço inoxidável e o alumínio;
- Construir um dispositivo conforme o proposto no Capítulo 4 para a realização de experimentos com corpos de prova planos, e comparar os resultados obtidos com CP tubulares para uma mesma condição de soldagem;
- Efetuar melhorias no calorímetro, visando facilitar a operação e reduzir o tempo de ajuste do equipamento para realização de experimentos, como por exemplo, acoplar ao sistema um sensor para medição da vazão d'água durante os experimentos e substituir os sensores de temperatura instalados atualmente no calorímetro por outros com maior sensibilidade e menor erro.

Esta lista de sugestões contempla apenas algumas abordagens que são passíveis de serem realizadas, uma vez que não é possível descrever todas as possibilidades de questionamento científico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abicor Binzel. **MIG/MAG Welding Torch System WH / WH-PP A**. Disponível em: <<http://www.binzel-abicor.com>>. Acesso em: 27 de dez. de 2012.

Abicor Binzel. **Robot Mount iCAT**. Disponível em: <<http://www.binzel-abicor.com/DE/eng/>>. Acesso em: 11 de jan. de 2013.

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.

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.

Bavaria Schweisstechnik. **Agglomerated Welding Flux BF 6.5**. Disponível em: <<http://www.subarcflux.com>>. Acesso em: 10 de jul. de 2013.

Belgo Bekaert. **Catálogo Comercial Belgo Bekaert Arames**. Disponível em: <<http://www.belgobekaert.com.br>>. Acesso em: 10 de jul. de 2013.

Bosworth, M. R. Effective Heat Input in Pulsed Current Gas Metal Arc Welding with Solid Wire Electrodes, **Welding Journal**, v. 70, p. 111s-117s, 1991.

Brasil. Projeto de Lei 00:002.04-001. *Tubos e conexões de poli(cloreto de vinila) clorado - CPVC - para sistemas de proteção contra incêndio por chuveiros automáticos - Requisitos e métodos de ensaio*. Edital 12:2007 da ABNT, 2007.

Cantin, G. M. D.; Francis, J. A. Arc Power and Efficiency in Gas Tungsten Arc Welding of Aluminium, **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 10, p. 200-210, 2005.

CIMM. **Petrobras e Senai Irão Implantar Laboratório de Excelência em Soldagem**. Disponível em: <<http://www.cimm.com.br>>. Acesso em: 07 de jan. de 2013.

Collings, N.; Wong, K. Y.; Guile, A. E. Efficiency of Tungsten-Inert Gas Arcs in Very High-Speed Welding, **Proceedings of the IEEE**, v. 126, p. 276-280, 1979.

DCB Oxigênio. **Guia da Solda TIG**. Disponível em: <<http://www.oxigenio.com>>. Acesso em: 01 de jun. de 2013.

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

ESAB. **Apostila Arco Submerso – Revisão 2004**. Disponível em: <<http://www.esab.com.br>>. Acesso em: 22 de mai. de 2013.

ESAB. **MIG/MAG or GMAW**. Disponível em: <<http://www.esab.com>>. Acesso em: 14 de dez. de 2012.

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

Fortes, M. A.; Rosa, M. E.; Pereira, H. **A Cortiça**. IST Press, Lisboa, 2004.

Fronius. **Catálogo de Produtos Trans Synergic / TransPuls Synergic 3200/4000/5000/7200/9000 – PB**. Disponível em: <<http://www.fronius.com>>. Acesso em: 26 de mai. de 2013.

Fronius. **TransPuls Synergic 4000**. Disponível em: <<http://www.fronius.com>>. Acesso em: 26 de mai. de 2013.

Fuerschbach, P. W.; Knorovsky, G. A. A Study of Melting Efficiency in Plasma Arc and Gas Tungsten Arc Welding, **Welding Journal**, v. 70, p. 287s-297s, 1991.

Fuerschbach, P. W. Measurement and Prediction of Energy Transfer Efficiency in Laser Beam Welding, **Welding Journal**, v. 75, p. 24s-34s, 1996.

Fuerschbach, P. W. **ETE Table - 2004**. Disponível em: <<http://smartweld.sourceforge.net>>. Acesso em: 16 de jun. de 2013.

Ghent, H. W.; Roberts, D. W.; Hermance, C. E.; Kerr, H. W.; Strong, A. B. Arc Efficiencies in TIG Welds. In: **Conference Arc Physics and Weld Pool Behavior, The Welding Institute**, London, 1979.

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

Gil L., **Cortiça – Produção, Tecnologia e Aplicação**, INETI, Lisboa, 1998.

Gonçalves, C. V.; Vilarinho, L. O.; Scotti, A.; Guimarães, G. Estimation of Heat Source and Thermal Efficiency in GTAW Process by Using Inverse Techniques, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 172, p. 42-51, 2005.

Gonzalez, A. R. *Efeito da Forma da Onda sobre as Características de Fusão na Soldagem MIG/MAG com Corrente Pulsada*, Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

Haelsing, 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.

Hiraoka, K.; Sakuma, N.; Zijp, J. Energy Balance in Argon-Helium Mixed Gas Tungsten (TIG) Arcs - Study of Characteristics of Gas Tungsten Arc Shielded by Mixed Gases (3rd Report), **Welding International**, v. 12, p. 372-379, 1998.

Houldcroft, P. T. **Welding Processes**. Cambridge University Press, Cambridge, 1979.

IMC Soldagem. **Manual de Operações Digiplus A7 – 3ª Edição 2011**. Disponível em: <<http://www.imc-soldagem.com.br>>. Acesso em: 15 de jun. de 2013.

IMC Soldagem. **Manual do Sistema SAP – V 4.01**. Disponível em: <<http://www.imc-soldagem.com.br>>. Acesso em: 10 de jul. de 2013.

Incropera, F. P.; De Witt, D. P.; Bergman, T. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. LTC, Rio de Janeiro, 2008.

Joseph, A. P. *Assessing the Effects of GMAW-Pulse Parameters on Arc Power and Weld Heat Input*, Tese (Master of Science) – Ohio State University, Ohio, 2001.

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.

Knorovsky, G. A.; Fuerschbach, P. W. Calorimetry of Pulsed vs. Continuous Gas Tungsten Arc Welds, **Proceedings to International Conference on Trends in Welding Research**, p. 393-399, 1986.

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

Kumaresan, D.; Asraff, A. K.; Muthukumar, R. Numerical Investigation on Heat Transfer and Residual Stress in a Butt Welded Plate, **Pressure Vessel Technology**, v. 133, p. 122-132, 2011.

Liskevych, O.; Quintino, L.; Vilarinho, L.; Scotti A. Intrinsic errors on Cryogenic Calorimetry Applied to Arc Welding, Doc XII-2061-12/212-1218-12, **Commission IV – XII, Intermediate Meeting**, Berlim, Alemanha, 2012.

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

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

Melfi, T. New Code Requirements for Calculating Heat Input, **Welding Journal**, v. 89, p. 61-65, 2010.

Mercante Tubos. **Catálogo Comercial**. Disponível em: <<http://www.mercantetubos.com.br>>. Acesso em: 07 de fev. de 2013.

Metcalfe, J. C.; Quigley, M. B. C. Heat Transfer in Plasma Arc Welding, **Welding Journal**, v. 54, p. 99s-103s, 1975.

Motoman. **MA1400**. Disponível em: <<http://www.motoman.com>>. Acesso em: 15 de jan. de 2013.

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 Consequências sobre as Previsões Geométricas, Térmicas e Metalúrgicas da Junta, **Soldagem e Inspeção**, v. 12, p. 97-106, 2007.

Niles, R. W.; Jackson, C. E. Weld Thermal Efficiency of the GTAW Process, **Welding Journal**, v. 54, p. 25s-32s, 1975.

Nunes, A. C. An Extended Rosenthal Weld Model, **Welding Journal**, v. 62, p. 165s-170s, 1983.

Pépe, 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.

Quintino, L.; Liskevich, O.; Vilarinho, L.; Scotti A. Heat Input in Full Penetration Welds in Gas Metal Arc Welding (GMAW), **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, DOI 10.1007/s00170-013-4862-8, 2013.

Reis, R. P.; Costa, A. L. G.; Silveira, F. M.; Mota, P. R.; Souza, R. J.; Scotti, A. Influência do Material de Base sobre o Rendimento de Fusão em Soldagem a Arco, **Soldagem e Inspeção**, v. 16, p. 369-376, 2011.

Rosenthal, D. Mathematical Theory of Heat Distribution during Welding and Cutting, **Welding Journal**, v. 20, p. 220s-234s, 1941.

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.

Smartt, H. B.; Stewart, J. A.; Einerson, C. J., Heat Transfer in Gas Tungsten Arc Welding, **ASM Metals/Materials Technology Series, ASM 8511-011**, Ohio, 1985.

Soderstrom, E. J.; Scott, K. M.; Mendez, P. F. Calorimetric Measurement of Droplet Temperature in GMAW, **Welding Journal**, v. 90, p. 1s-8s, 2011.

SPS. **Tartilope v4 – Manual do Equipamento**. Disponível em: <http://www.sps-soldagem.com.br/tartilope_v4.html>. Acesso em: 07 de jun. de 2013.

Stenbacka, N.; Choquet, I.; Hurtig, K. Review of Arc Efficiency Values for Gas Tungsten Arc Welding, Doc. XII-2070-12/212-1229-12, **Commission IV – XII, Intermediate Meeting**, Berlim, Alemanha, 2012.

Tigre. **Ficha Técnica dos Produtos Aquatherm – Linha 7**. Disponível em: <<http://www.tigre.com.br>>. Acesso em: 15 de jan. de 2013.

Tusek, J.; Suban, M. Experimental Research of the Effect of Hydrogen in Argon as a Shielding Gas in Arc Welding of High-Alloy Stainless Steel, **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 25, p. 369-376, 2000.

White Martins, **Equipamento Unionmelt AS-800/AS-800E – Instruções**. S. A. White Martins, Rio de Janeiro, 1978.

Zijp, J. P.; Ouden G. The Effect of Gas Composition on Heat Transport During GTA Welding, **Proceedings to International Conference Advances in Joining and Cutting Processes**, p. 24-32, 1990.