



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Tese de Doutorado

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DO GÁS
UTILIZADO NO PROCESSO GTAW SOBRE AS
CARACTERÍSTICAS DO ARCO E MORFOLOGIA DA
SOLDA

Autor: Nilo Nogueira da Silva

Orientador: Prof. Alexandre Queiroz Bracarense, PhD

Belo Horizonte, 2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Nilo Nogueira da Silva

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DO GÁS
UTILIZADO NO PROCESSO GTAW SOBRE AS
CARACTERÍSTICAS DO ARCO E MORFOLOGIA DA
SOLDA**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Linha de pesquisa: Soldagem a Arco com Proteção Gasosa

Orientador: Prof. Alexandre Queiroz Bracarense, PhD

Belo Horizonte
Escola de Engenharia Mecânica da UFMG
2018

S586i

Silva, Nilo Nogueira da.

Influência da temperatura do gás utilizado no processo GTAW sobre as características do arco e morfologia da solda [manuscrito] / Nilo Nogueira da Silva. – 2018.

86 f., enc.: il.

Orientador: Alexandre Queiroz Bracarense.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 76-86.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Processos de fabricação - Teses. 3. Gases - Propriedades térmicas - Teses. 4. Soldagem - Teses. I. Bracarense, Alexandre Queiroz, 1959-. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário
31270-901 - Belo Horizonte - MG

Tel.: +55 31 3409.5145

E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

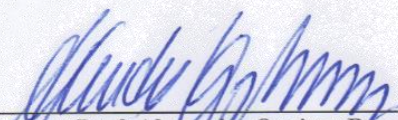
**"INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DO GÁS UTILIZADO NO
PROCESSO GTAW SOBRE AS CARACTERÍSTICAS DO ARCO E
MORFOLOGIA DA SOLDA"**

NILO NOGUEIRA DA SILVA

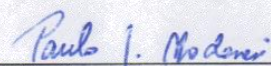
Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de **"Doutor em Engenharia Mecânica"**, na área de concentração de **"Processos de Fabricação"**.

Tese aprovada no dia 26 de outubro de 2018.

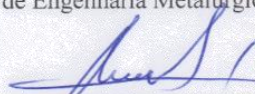
Por:



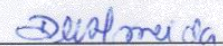
Prof. Alexandre Queiroz Bracarense
Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/ UFMG



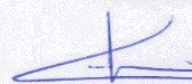
Prof. Paulo José Modenesi
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais/ UFMG



Prof. Ariel Rodríguez Arias
Departamento de Engenharia Mecânica/ UFMG



Prof. Daisy Martins de Almeida
Universidade Federal da Paraíba



Prof. Cláudio Turani Vaz
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

DEDICATÓRIA

*À minha mãe, Nilza Santos Nogueira, à toda a minha família
e à minha esposa Cyntia Amorim Nogueira.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me guiar, iluminar e me dar tranquilidade para seguir adiante com os meus objetivos e não me desanimar com as dificuldades.

À minha mãe, Nilza Santos Nogueira, base de minha vida, pelo apoio, conversas e motivação para superar mais esta etapa de minha vida. Sem você em minha vida, nada seria possível.

À minha esposa, Cyntia Amorim Nogueira, minha companheira de todas as horas, meu ponto de equilíbrio. Seu carinho e sua forma positiva de enfrentar as situações difíceis foram um incentivo ainda maior para eu conseguir chegar até aqui.

Às minhas irmãs, Nathalia Nogueira da Silva e Nayara Nogueira da Silva, minhas melhores amigas de toda a vida.

A meu avô Candido dos Santos Nogueira (*in memoriam*), pelo carinho, amizade e por ser um grande exemplo em minha vida. Seus ensinamentos me possibilitaram ser o que sou hoje.

À minha tia, Zeni dos Santos Nogueira, por agir como uma segunda mãe em minha vida e pelas incalculáveis ajudas durante este percurso.

Aos meus sogros, José e Valentina de Amorim, por me aceitaram como membro da família e por todos os momentos de alegria e de descanso do trabalho.

À minha cunhada Claudilene de Amorim pela amizade e carinho e ainda pela grande oportunidade de ser padrinho de seu filho Bernardo Henrique.

Ao Prof. Dr. Alexandre Queiroz Bracarense, pela oportunidade no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Paulo José Modenesi pelos valiosos ensinamentos e sugestões, transmitidos com extrema paciência e dedicação.

Ao Prof. Dr. Sergio Brandi pela oportunidade de conhecer o Laboratório de Soldagem da POLI/USP, além das instruções e conversas.

Aos parceiros do Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação (LRSS): Alexandre, Aline, Prof. Ariel, Bruno, Camila, Carlos, Carolina Gonçalves, Prof. Claudio, Profa. Daisy, Danielle, Diego, Prof. Ezequiel, Erriston, Etiene, Fagner, Felipe, Frank, Gabriel, Gedael, Joauro, José

Roberto, Leandro, Luana, Prof. Luciano, Luiz Henrique, Luiz, Marco, Marlon, Mateus Codognotto, Moara, Renata, Sheron, Tamires, Tarcizio, Wagner.

Marcus Valle, Henrique e Fernando Avelar do LRSS pelas assistências prestadas.

Ao Marcelo Teodoro, Diogo Sousa e Miguel Antonello do LRSS pela amizade e boas conversas.

Ao Andrés Mauricio Moreno Uribe, também membro do LRSS, pelo suporte nos experimentos.

Ao grande amigo Pedro Henrique Ribeiro Menezes do LRSS pelos inúmeros subsídios e sugestões que contribuíram para a realização e enriquecimento deste trabalho.

Ao Rubelmar da POLI/USP pelo convite de conhecer novas técnicas experimentais e pelas preciosas discussões, que muito enriqueceram este trabalho.

A todos os membros do Laboratório de Soldagem da POLI/USP, pela recepção e discussões.

Aos meus grandes amigos, que estão ao meu lado há muitos anos, em especial, Bruno, Everaldo, Fábio, Felipe Borges, Felipe Moreira, L. Fernando, Juninho, Leandro, Michel, Paulo Henrique, Robson.

Àqueles que me ensinaram e ajudaram à minha formação, em especial, Elenice Borba, Wagner Sade, José Vilela.

À UFMG pelo grande suporte em minha formação.

Meu reconhecimento aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG, por tudo que me ensinaram e auxiliaram.

À agência financiadora deste projeto, CAPES.

À TBI Industries de Contagem pelo suporte em equipamentos, em especial, ao Alexander Fischer pela disponibilidade e assistências prestadas.

A todos que contribuíram, para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

*“Cada pessoa deve trabalhar para o seu aperfeiçoamento
e, ao mesmo tempo, participar da responsabilidade
coletiva por toda a humanidade”.*

Marie Curie

RESUMO

O arco elétrico é a fonte de calor mais utilizada na soldagem por fusão de materiais metálicos, pois apresenta uma combinação ótima de características. Como consequência, os processos a arco têm uma grande importância industrial na atualidade e uma delas é a soldagem GTAW que utiliza um gás de proteção responsável por afetar diversas características desse processo e, consequentemente, as propriedades das soldas produzidas. Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência do pré-aquecimento do gás utilizado no processo de soldagem GTAW. Foi desenvolvido um sistema de aquecimento que permitiu a variação e controle da temperatura de saída do gás durante a realização dos testes. Foi proposta uma metodologia de estudo do arco elétrico, avaliando-se os valores de tensão-corrente, perfil, luminosidade e rendimento térmico. Os resultados demonstraram que a temperatura do gás influenciou nas características do arco elétrico e nos valores de tensão, principalmente, para menores correntes de operação. O gás aquecido proporcionou uma expansão do arco apresentando uma maior área e maior produção luminosa. O rendimento térmico do processo diminuiu em razão das maiores perdas de calor observadas. Foram realizadas soldas sobre chapa com diferentes temperaturas do gás, observando-se sua penetração e largura. O estudo da morfologia das soldas mostrou que o aumento da temperatura do gás provocou maior fusão do metal-base nas bordas soldas do que na região central, estando esse efeito relacionado à maior expansão do arco. Dessa maneira, o uso do pré-aquecimento do gás possibilitou a obtenção de arco elétrico e soldas com características diferentes do processo convencional.

Palavras-chave: Soldagem GTAW. Física da Soldagem. Arco elétrico. Temperatura do Arco. Aquecimento do gás de proteção. Propriedades dos gases.

ABSTRACT

The electric arc is the most widely used heat source in the fusion welding of metallic materials, since it presents an optimum combination of characteristics. As a consequence, arc processes are of great industrial importance today and one of them is GTAW which uses a shielding gas responsible for affecting several characteristics of this process and, consequently, the properties of the welds produced. This paper aims to evaluate the influence of the preheating of the gas used in the GTAW process. A heating system was developed that allowed the variation and control of the gas outlet temperature during the tests. It was proposed a methodology of study of the electric arc, evaluating the values of voltage-current, profile, luminosity and thermal yield. The results showed that the gas temperature influenced the characteristics of the electric arc and the voltage values, mainly for lower currents. The heated gas provided an expansion of the arc presenting a larger area and greater light production. The thermal yield of the process decreased due to the higher heat losses. Welds were performed with different gas temperatures, observing its penetration and width. The study of the morphology of the welds showed that the increase of the gas temperature caused a greater fusion of the base metal at the weld edges than in the central region, being this effect related to the greater expansion of the arc. In this way, the use of preheated gas made it possible to obtain electric arc and welds with different characteristics of the conventional process.

Key-words: GTAW. Welding Physics. Electric arc. Arc Temperature. Protection Gas Heating. Properties of gases.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 - Curvas características do arco GTAW para comprimentos de arco de 2, 4 e 6 mm.	17
Figura 2.2 - Distribuição de potencial em um arco e suas regiões: (a) Zona de Queda Catódica (b) Coluna do Arco e (c) Zona de Queda Anódica.	18
Figura 2.3 - Estrutura esquemática da região catódica.	19
Figura 2.4 - Representação esquemática de um arco GTAW com (a) ânodo difuso e com (b) ânodos pontuais.	21
Figura 2.5 - Composição do plasma de argônio em função da temperatura.	24
Figura 2.6 - Grau de ionização do argônio.	24
Figura 2.7 - Esquema da distribuição de energia na soldagem a arco para o processo GTAW.	26
Figura 2.8 - Calorímetro com fluxo contínuo de água.	27
Figura 2.9 - Eficiência térmica média do processo de soldagem GTAW reportada por diversos autores.	28
Figura 2.10 – Condutividade elétrica em função da temperatura para o argônio.	30
Figura 2.11 – Condutividade térmica em função da temperatura para o argônio.	31
Figura 2.12 – Viscosidade em função da temperatura para o argônio.	31
Figura 2.13 – Densidade de massa em função da temperatura para o argônio.	32

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 – Sistema desenvolvido para o aquecimento do gás de proteção.	34
Figura 3.2 - Esquema do posicionamento do termopar para medida da temperatura do gás em relação à tocha GTAW.	34
Figura 3.3 - Bancada de experimentos do arco elétrico.	36
Figura 3.4 - Diagrama esquemático para a aquisição de dados.	37
Figura 3.5 - Esquema para medida da área do arco utilizando o software ImageJ. (a) Metodologia ponto a ponto e (b) Threshold.	39
Figura 3.6 – Representação de um eletrodo afiado com ângulo Θ , cuja área assumida para emissão é a área lateral de um cone de base circular.	39
Figura 3.7 - Montagem para aquisição da luminosidade do arco elétrico.	41
Figura 3.8 - Calorímetro de fluxo contínuo desenvolvido para a análise da eficiência térmica de processos de soldagem.	42
Figura 3.9 - Curvas típicas de tensão e corrente de soldagem para o processo de soldagem GTAW. ..	43
Figura 3.10 - Bancada de experimentos utilizada para as soldagens.	46
Figura 3.11 - Corpo de prova para realização das soldas, medidas em mm.	46
Figura 3.12 - Posição de retirada das amostras das soldas para a realização das caracterizações.	48

Figura 3.13 – (a) Calibração da imagem e aplicação de escala. (b) Metodologia para a medida das áreas das soldas.	48
--	----

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 - Curva característica do arco elétrico GTAW para o gás em diferentes temperaturas.	50
Figura 4.2 – Diferença entre os valores de tensão medidos para o gás sem e com aquecimento em função das menores correntes.	51
Figura 4.3 - Imagens do arco elétrico em relação às maiores correntes e à temperatura de aquecimento do gás. Ambiente (a) e 150°C (b).	53
Figura 4.4 - Imagens do arco elétrico para as correntes mais baixas. Temperatura do gás de proteção (a) Ambiente e (b) 150°C.	53
Figura 4.5 - Área do arco elétrico medida pelo software Image J em função da corrente e temperatura de aquecimento do gás.	54
Figura 4.6 – Eletrodos após realização de testes com o gás aquecido.	55
Figura 4.7 - Luminosidade do arco elétrico em função da corrente para o gás sem e com aquecimento.	57
Figura 4.8 - Evolução dos sinais de temperatura da água durante realização dos ensaios de calorimetria.	58
Figura 4.9 - Sinais de vazão durante a realização dos ensaios.	58
Figura 4.10 - Evolução dos sinais de temperatura da água somente com o aquecimento do gás de proteção.	59
Figura 4.11 – Valores médios de P_{inst} , ES e Q_{imp} em função da corrente e temperatura do gás de proteção.	61
Figura 4.12 – Diferença dos valores medidos nos experimentos de calorimetria para o gás sem e com aquecimento.	62
Figura 4.13: Valores medidos do rendimento térmico do processo GTAW para o gás sem e com aquecimento.	63
Figura 4.14: Valores de tensão e corrente medidos para as soldas.	65
Figura 4.15 - Macroestruturas das soldas para diferentes temperaturas do gás de proteção.	66
Figura 4.16: Penetração das soldas para diferentes temperaturas do gás de proteção.	68
Figura 4.17: Largura das soldas para diferentes temperaturas do gás de proteção.	68
Figura 4.18: Área das soldas para diferentes temperaturas do gás de proteção.	69
Figura 4.19: Imagens das superfícies de soldas com diferentes vazões do gás de proteção aquecido a 150°C.	70

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 2-1: Potencial de ionização de gases e vapores metálicos em elétron volts (eV).	23
Tabela 2-2: Resultados encontrados na literatura de eficiência térmica do processo GTAW para diferentes calorímetros.	29
Tabela 2-3: Resultados de estudos sobre eficiência térmica do processo de GTAW recolhidos pelo autor STENBACKA (2013).	30

CAPÍTULO 3

Tabela 3-1: Condições utilizadas para a aquisição das curvas características do arco elétrico GTAW.	38
Tabela 3-2: Parâmetros da soldagem utilizados para aquisição da luminosidade.	40
Tabela 3-3: Experimentos propostos para o processo de soldagem GTAW.	45
Tabela 3-4: Composição química especificada do metal-base utilizado no estudo.	45
Tabela 3-5: Parâmetros da soldagem utilizados para a realização experimental.	47

CAPÍTULO 4

Tabela 4-1: Valores obtidos de tensão-corrente.	50
Tabela 4-2: Contribuição energética fornecida pelo aquecimento do gás de proteção.	52
Tabela 4-3: Dados adquiridos para a luminosidade do arco elétrico.	56
Tabela 4-4: Resultados dos experimentos de calorimetria para processo GTAW sem aquecimento do gás.	60
Tabela 4-5: Resultados dos experimentos de calorimetria para processo GTAW com aquecimento do gás.	60
Tabela 4-6: Diferença dos valores medidos nos experimentos de calorimetria para o gás de proteção sem e com aquecimento.	62
Tabela 4-7: Valores medidos da largura e penetração das soldas.	67
Tabela 4-8: Valores medidos da área das soldas.	67

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

GTAW - Gas Tungsten Arc Welding	n - Número de pontos amostrados durante o processo de soldagem
TIG - Tungsten Inert Gas	η - Rendimento térmico do processo de soldagem
CC- - Corrente contínua eletrodo negativo	Q_{imp} - Calor imposto
l_A - Comprimento do arco	E_{arco} - Energia gerada pelo arco
U_a - Queda Anódica	E_{perdas} - Energia perdida para o ambiente
U_c - Queda Catódica	$E_{fusão}$ - Energia efetivamente gasta para fundir o metal base
E - Campo elétrico na coluna	EWP - Eletrodo de tungstênio puro
J - Densidade de corrente	Q_a - Aporte térmico
A - Constante termiônica [$7,0 \cdot 10^5 \text{ A/m}^2$]	$\dot{m}$ - Massa de vazão de água
T - Temperatura absoluta	C_p - Calor específico da água
e - Carga do elétron [$1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$]	T_s - Temperatura de saída da água
ϕ - Função trabalho do material	T_e - Temperatura de entrada da água
k - Constante de Boltzmann [$1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$]	V_{H_2O} - Vazão de água no calorímetro
ΔG_0 - Energia livre de dissociação	ρ - Massa específica da água
α - Grau de ionização	V - Volume do gás
p ou P - Pressão do gás	R - Constante dos gases [$8,31447 \text{ J/molK}$]
p_o - Pressão atmosférica	$\dot{n}$ - Número de mols
m_e - Massa do elétron	σ_e - Condutividade elétrica da coluna do arco
h - Constante de Planck	t_s - Tempo de soldagem
z^+ - Íon	L_s - Comprimento da solda
z - Neutro	σ - Constante de Stefan-Boltzmann [$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$]
C - Constante de proporcionalidade	Re - Numero de Reynolds
V_I - Primeiro estágio de ionização do elemento	w - Velocidade do plasma
E_s - Energia de soldagem	ρ_p - Densidade do plasma
P_{inst} - Potência instantânea média	μ_d - Viscosidade dinâmica do plasma.
v_s - Velocidade de soldagem	
U - Tensão de soldagem	
I - Corrente elétrica	

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1. Características Estáticas do Arco Elétrico.....	17
2.2. Perfil Elétrico	18
2.2.1. Região Catódica	19
2.2.2. Região Anódica	21
2.2.3. Coluna de Plasma	22
2.3. Fluxo de Calor na Soldagem	25
2.3.1. Calorímetro de Água	27
2.3.2. Valores de Rendimento Térmico Obtidos em Estudos Anteriores.....	28
2.4. Propriedades do Argônio em Função da Temperatura.....	30
3. MATERIAIS e MÉTODOS	33
3.1. Materiais e Equipamentos	33
3.2. Métodos.....	33
3.3. Sistemas de Aquecimento por Resistência Elétrica	33
3.4. Estudo do Arco Elétrico	34
3.4.1. Sistema de Aquisição de Dados	35
3.4.2. Aquisição da Curva Tensão-Corrente	37
3.4.3. Imagens do Arco Elétrico.....	38
3.4.4. Luminosidade	40
3.5. Calorimetria.....	41
3.5.1. Metodologia de Cálculo da Potência Elétrica	42
3.5.2. Metodologia de Cálculo da Energia de Soldagem	43
3.5.3. Metodologia para a Obtenção do Aporte Térmico.....	43

3.5.4. Procedimento Experimental dos Ensaios de Calorimetria	44
3.6. Soldagem	45
3.6.1. Procedimento Experimental para a Soldagem.....	47
3.7. Análise Macroestrutural	47
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
4.1. Estudo do Arco Elétrico	49
4.1.1. Curva Tensão-corrente	49
4.1.2. Imagens e Luminosidade do Arco Elétrico	53
4.1.3. Rendimento Térmico do Processo.....	57
4.2. Análise das Soldas.....	64
5. CONCLUSÕES.....	71
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
ANEXOS.....	77
Anexo 1	77
Anexo 2	78
Anexo 3	80
Anexo 4	85

1. INTRODUÇÃO

O arco elétrico é a fonte de calor mais utilizada na soldagem por fusão de materiais metálicos, pois apresenta uma combinação ótima de características, incluindo uma concentração adequada de energia para a fusão localizada do metal de base. Com isso, os processos em que se utiliza o arco elétrico têm atualmente uma grande importância industrial, pois é empregado na fabricação dos mais variados componentes e estruturas metálicas e na recuperação de peças danificadas ou desgastadas (MODENESI, 2015).

O arco elétrico da soldagem é uma descarga elétrica sustentada por meio de um gás ionizado, em alta temperatura, que gera calor suficiente para promover a fusão de metais. O arco compreende uma região relativamente pequena do espaço (aproximadamente, 100mm^3), caracterizada por elevadas temperaturas (em torno de 20.000K), forte radiação luminosa e ultravioleta, fluxo intenso de matéria e elevados gradientes de propriedades físicas (LISBOA et al, 2014).

Um processo que faz uso do arco elétrico como fonte de energia, para a fusão dos materiais a serem soldados, é o GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) também chamado de TIG (*Tungsten Inert Gas*).

Nesse processo de soldagem, o gás de proteção utilizado apresenta propriedades físicas, como densidade, condutividade térmica e elétrica, potencial de ionização, entre outras, capazes de afetar as características operacionais de arcos de soldagem. Assim, parâmetros como a tensão de operação, o calor gerado, o perfil térmico e a eficiência do arco que, por sua vez, afetam a geometria (formato, largura e penetração) das soldas, são fortemente influenciados pelas propriedades do gás usado (MARQUES et al., 1998).

Entretanto, apesar de vários estudos sobre os gases empregados nos processos de soldagem, ainda existem fenômenos pouco ou não pesquisados. Por exemplo, o estudo do emprego de um gás de proteção pré-aquecido. Assim, o ajuste desta nova variável pode proporcionar mais uma possibilidade de manipulação do arco elétrico do processo e, em consequência, a obtenção de soldas com diferentes características das apresentadas no processo convencional.

Na literatura foi encontrado um caso da aplicação do aquecimento do gás de proteção na soldagem GMAW (ULLER et al., 2016), porém com uma metodologia e temperaturas de

aquecimento do gás de proteção diferentes das apresentadas neste trabalho, destacando-se, dessa forma, aplicação inovadora no processo GTAW.

Pelos resultados obtidos neste trabalho, observou-se, do ponto de vista aplicativo, que os conhecimentos dos efeitos do pré-aquecimento do gás de proteção podem ser de muito valor, em casos que se requer baixo aporte térmico e arco elétrico estável, por exemplo, em soldagem micro TIG e de chapas finas.

Desta forma, objetivou-se avaliar o efeito do pré-aquecimento do gás de proteção utilizado no processo de soldagem GTAW, nas características do arco elétrico, como tensão de operação, perfil, luminosidade, rendimento térmico do processo e na morfologia das soldas. Para isso, dividiu-se a realização do trabalho em etapas, a saber:

- Desenvolvimento de sistema de aquecimento para o gás.
- Estudo do arco elétrico GTAW, sem e com o aquecimento do gás, avaliando-se a relação da tensão-corrente, perfil, luminosidade e rendimento térmico.
- Realização e caracterização de soldas com o gás de proteção aquecido.

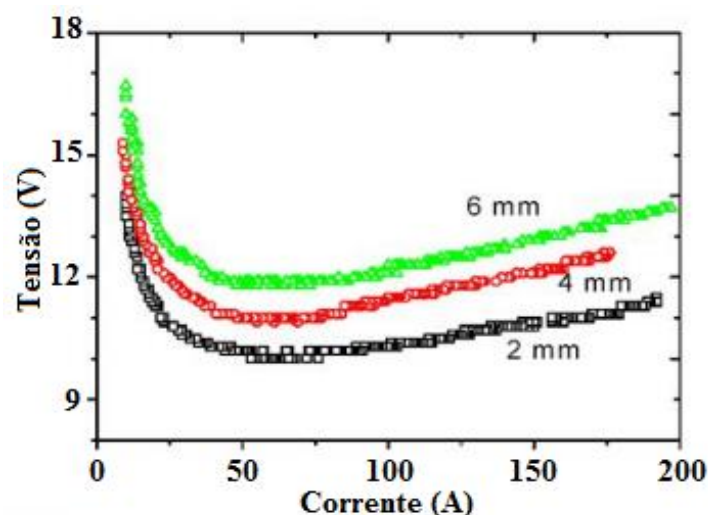
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Características Estáticas do Arco Elétrico

Exemplos obtidos em laboratório da relação tensão-corrente (curva característica), para o arco GTAW (eletrodo CC-), são mostrados na Figura 2.1. Esta relação é chamada de estática por não incorporar variações dinâmicas de corrente ou tensão associadas, por exemplo, com a transferência de metal de adição pelo interior do arco. A curva característica apresenta uma queda de tensão com a corrente até um valor mínimo entre 50 e 80A, acima do qual a tensão cresce com a corrente. Isto pode ser explicado pelo fato de que o aumento da corrente elétrica incorre em maior aquecimento do cátodo (facilitando a emissão de elétrons) e maior grau de ionização e aquecimento do meio, em que o arco ocorre, resultando em maior facilidade para a passagem de corrente e, como consequência, uma diminuição da tensão elétrica do arco (MARQUES et al, 2011).

A posição da curva característica e o seu formato dependem do tamanho, geometria, material e temperatura do cátodo e do ânodo, da composição e da pressão do gás de proteção e do comprimento do arco (l_a).

Figura 2.1 - Curvas características do arco GTAW para comprimentos de arco de 2, 4 e 6 mm.



FONTE: MARQUES e MODENESI, 2015.

O material do cátodo tem um grande valor sobre a curva característica. No caso de cátodos de tungstênio, utilizados no processo GTAW, a adição de pequenas quantidades de óxidos de

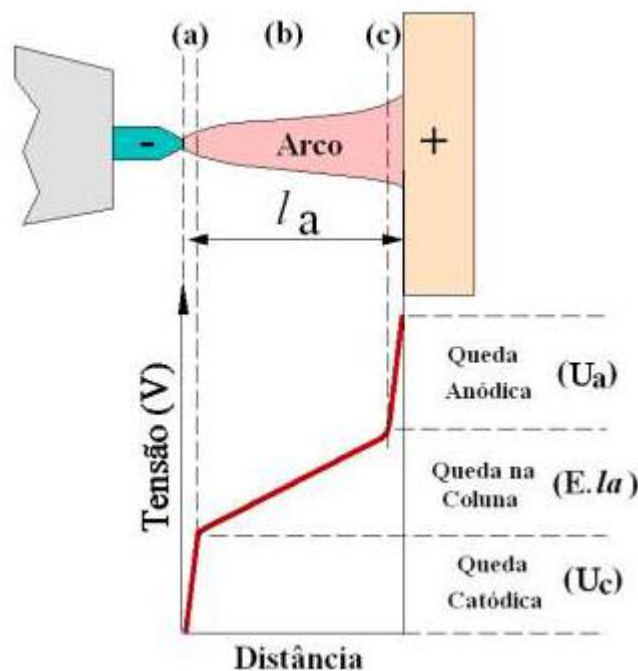
diferentes metais modificam as condições de emissão de elétrons e abaixam a tensão do arco por cerca de 1 a 2V.

Conforme foi definida a curva característica, os seus valores de corrente e tensão devem ser obtidos, após o processo atingir condições estacionárias e não devem ser afetados por flutuações dinâmicas do processo (isto é, devem ser valores médios calculados em intervalos de tempo suficientemente longos) (MODENESI 2014).

2.2. Perfil Elétrico

A queda de tensão, ao longo de um arco elétrico, não é uniforme, havendo quedas abruptas de tensão junto aos eletrodos (ânodo e cátodo), as quais podem atingir um intervalo de, aproximadamente, 1 a 15V para metais. A Figura 2.2 representa a variação de tensão entre os eletrodos e a localização das diferentes regiões do arco elétrico, zona de queda catódica, zona de queda anódica e coluna de plasma (ROTH, 1995).

Figura 2.2 - Distribuição de potencial em um arco e suas regiões: (a) Zona de Queda Catódica (b) Coluna do Arco e (c) Zona de Queda Anódica.



FONTE: MODENESI, 2014.

O valor da queda de tensão na coluna de plasma é, aproximadamente, proporcional à l_a , isto é, $U_{CP} = E.l_a$, em que E é o campo elétrico na coluna, que depende de vários fatores, em particular,

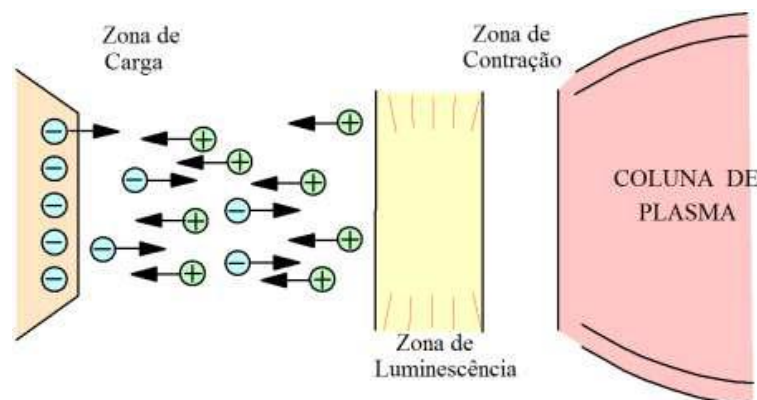
da composição do gás do plasma. Por exemplo, no arco GTAW, E vale entre 800 e 1000V/m para o argônio. Este valor aumenta, quando o arco perde mais energia para o ambiente, (por exemplo, para um mesmo gás, E é maior para um arco restringido).

As regiões de queda anódica e catódica são caracterizadas por elevados gradientes térmicos e a soma das quedas de potencial nessas regiões é, aproximadamente constante, independente das condições de operação do arco (GUILLE, 1971).

2.2.1. Região Catódica

A região catódica é extremamente fundamental para a existência do arco, pois é nesta região que é gerada a maioria dos elétrons responsáveis pela condução da corrente elétrica no arco. Ela é formada por três regiões distintas (Figura 2.3), denominadas como zona de carga, zona de luminescência e zona de contração.

Figura 2.3 - Estrutura esquemática da região catódica.



FONTE: MODENESI, 2014.

A zona de carga é denominada como tendo elevado gradiente de potencial, que acelera os elétrons saindo do cátodo e, por outro lado, atrai os íons positivos para o cátodo. Apesar de ser uma zona com grande atividade de cargas, praticamente não ocorrem colisões entre os diversos portadores de carga e entre átomos neutros. Um fato determinante nesta zona é a queda de potencial, que é explicado pelo maior número de portadores de carga positiva (GUILLE, 1971; MODENESI 2015).

A desaceleração dos elétrons ocorre na zona de luminescência, visto que a transformação da energia cinética dos elétrons em radiação eletromagnética é muito intensa.

Na zona de contração, que serve de interface entre a região catódica e a coluna do arco, a densidade de corrente passa dos altos valores característicos da região catódica para os valores bem menores da coluna (MODENESI, 2015).

Diversos mecanismos podem operar e ser responsáveis pela emissão de elétrons no cátodo. Na descarga luminescente, íons positivos são acelerados pela elevada tensão na região do cátodo (10^2V), chocando-se os dois, em elevada energia cinética, de forma a causar a emissão de elétrons pelo material do cátodo. Outros mecanismos (choque de átomos neutros e de fótons no cátodo) parecem auxiliar a emissão de elétrons neste tipo de descarga. No arco elétrico, diferentes mecanismos de emissão são mais importantes, destacando-se a emissão termiônica, em cátodos de material refratário (MODENESI, 2015).

LIMA et al (2001) e ANDRADE et al (2013) citam que o efeito termiônico é observado, quando elétrons escapam do material, ao serem excitados com uma energia térmica superior à sua função-trabalho, que é a energia mínima para a remoção de um elétron do material. Esse efeito leva ao aparecimento de uma nuvem eletrônica, ao redor do material, que dificulta ou impede a saída de outros elétrons. Segundo esses autores, caso uma diferença de potencial seja aplicada entre o cátodo e o ânodo de um material nessa condição, inicia-se a passagem da corrente termiônica e elimina-se a nuvem e sua influência na emissão de novos elétrons.

A emissão termiônica é um fenômeno comum em válvulas eletrônicas e tubos de raios catódicos com eletrodos de tungstênio. Essa emissão resulta do aquecimento do material a uma temperatura suficientemente alta para causar a ejeção de elétrons de sua superfície. A densidade de corrente resultante do efeito termiônico pode ser estimada pela equação empírica de **Richardson-Dushman** (GUILÉ, 1971):

$$J = AT^2 \exp\left(-\frac{e\phi}{kT}\right) \quad \text{Eq. 2.1}$$

Nessa equação, a constante termiônica depende do material, da temperatura e da contaminação da superfície do eletrodo. Portanto quanto maior a temperatura do cátodo maior a densidade de corrente possível de se alcançar por efeito termiônico. Conforme RICHARDSON (1929), um corpo emite termionicamente um número de elétrons limitado por sua área em função de sua temperatura e material. Quanto menor a temperatura maior a área necessária para se emitir uma mesma quantidade de elétrons por efeito termiônico.

Na soldagem TIG, é comum a utilização de eletrodos de tungstênio contendo pequenas quantidades de óxidos de outros elementos. Estes óxidos reduzem a função-trabalho efetiva do

eletrodo, facilitando a emissão termiônica de elétrons no eletrodo. Assim, eletrodos dopados com óxidos operam a uma menor temperatura que eletrodos de tungstênio puro, não sofrendo nenhuma fusão em sua extremidade, a qual tende a manter a sua forma original, durante a soldagem (eletrodos de tungstênio puro tendem a ter a sua ponta fundida, a qual assume um formato hemisférico durante a soldagem) (CRUZ e SCOTTI, 2013).

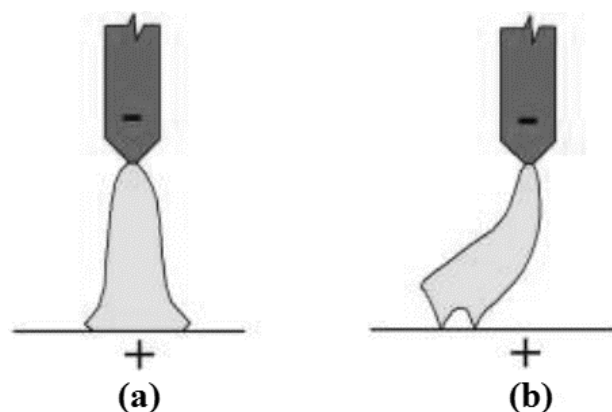
2.2.2. Região Anódica

Esta região não é tão importante para a manutenção do arco como a região catódica, no entanto é essencial para a continuidade do arco. O ânodo não emite íons positivos (estes são criados, principalmente, por ionização térmica na coluna do arco). Assim, na fina região de queda anódica, há maior concentração de elétrons (cargas negativas) os quais são responsáveis pelo aparecimento de uma queda de tensão nesta região (GUILLE, 1971; MODENESI 2015).

Vale destacar que a queda anódica depende de vários fatores, tendendo a se reduzir com a temperatura do ânodo e a aumentar com a sua condutividade térmica.

Quando utilizados valores suficientemente altos de corrente no arco GTAW, o ânodo formado na peça é difuso e ocupa uma área relativamente grande. Quando a corrente é reduzida, pode ocorrer uma transição com a formação de um ou mais ânodos pontuais e, conseqüentemente, de jatos de plasma direcionados a partir da peça. A formação de ânodos pontuais é favorecida pela presença de irregularidades, na superfície da peça, não ocorrendo, em geral, na mesma linha do eletrodo, isto é, o arco sofre uma deflexão. Uma vez formado um ânodo pontual, o arco tende a ficar ancorado nele, criando, assim, dificuldades operacionais (Figura 2.4).

Figura 2.4 - Representação esquemática de um arco GTAW com (a) ânodo difuso e com (b) ânodos pontuais.



FONTE: MODENESI, 2015 (Modificado).

2.2.3. Coluna de Plasma

A coluna do arco compreende praticamente todo o volume do arco, sendo constituída por partículas neutras (moléculas e átomos), íons e elétrons livres, os quais são responsáveis pela passagem da corrente elétrica entre os eletrodos. Para a sua ionização, o gás do arco é aquecido até temperaturas elevadas. A agitação térmica do gás promove choques entre os seus constituintes, ocasionando a sua ionização parcial e a consequente formação do plasma. As propriedades físicas dos gases, como densidade, condutividades térmica e elétrica, energia de ionização, entre outras, determinam, em grande parte, as características operacionais dos arcos de soldagem (MODENESI, 2014).

A coluna de plasma requer que se mantenha uma temperatura suficiente para sustentar o grau de ionização e quanto maior for a energia de ionização dos constituintes da coluna de plasma maior será a energia necessária, para manter o nível de ionização requerida, portanto maior deverá ser a temperatura do arco (LANCASTER, 1994).

Dados termodinâmicos, para a ionização, são, contudo mais difíceis de ser obtidos. Uma estimativa da variação do grau de ionização com a temperatura pode ser feita pela **Equação de Saha**, que é deduzida abaixo de uma forma simplificada. Para cada átomo ionizado, a variação de energia livre é:

$$\Delta G_0 = -kT \ln K = \Delta H_0 - T \Delta S_0 \quad \text{Eq. 2.2}$$

Em que

$$\Delta H_0 = eV_I \text{ e } \Delta S_0 = \int \frac{dq}{T} = \int c_p \frac{dT}{T} \quad \text{Eq. 2.3}$$

Integrando a equação da entropia e, considerando que c_p é independente da temperatura, temos que:

$$\Delta S_0 = c_p \ln(T) + A \quad \text{Eq. 2.4}$$

Resolvendo a Equação 2.4, considerando que c_p/k é igual a 5/2 e substituindo o valor da constante de equilíbrio (k), a **Equação de Saha** fica:

$$\frac{\alpha^2}{1-\alpha^2} \frac{p}{p_0} = CT^{5/2} \exp\left(-\frac{eV_I}{kT}\right) \quad \text{Eq. 2.5}$$

O valor da constante C não pode ser obtido, a partir de métodos termodinâmicos clássicos, mas, por meio de mecânica estatística, pode-se mostrar este valor para ionização única (Equação 2.6) (LANCASTER 1994).

$$\frac{\alpha^2}{1-\alpha^2} p/p_0 = \left(\frac{2\pi m_e}{h^2} \right)^{3/2} \frac{(kT)^{5/2}}{p_0} \frac{2z_+}{z} e^{-eV_I/kT} \quad \text{Eq. 2.6}$$

Assim, a equação de Saha, para ionização única do argônio, é determinada como apresentada abaixo (LANCASTER, 1994).

$$\frac{\alpha^2}{1-\alpha^2} p/p_0 = 1,264 \cdot 10^{-6} T^{5/2} (2 + e^{-2062/T}) \cdot e^{-183 \cdot 10^3/T} \quad \text{Eq. 2.7}$$

A Equação de Saha, relacionando o grau de ionização (α) com a temperatura, indica uma forte influência para a ionização da temperatura e da "força motriz" (ΔG_0 ou eV_I). A Tabela 2-1 mostra o valor do potencial de ionização para alguns gases e vapores metálicos que apresentam interesse para a soldagem (LINNERT, 1994).

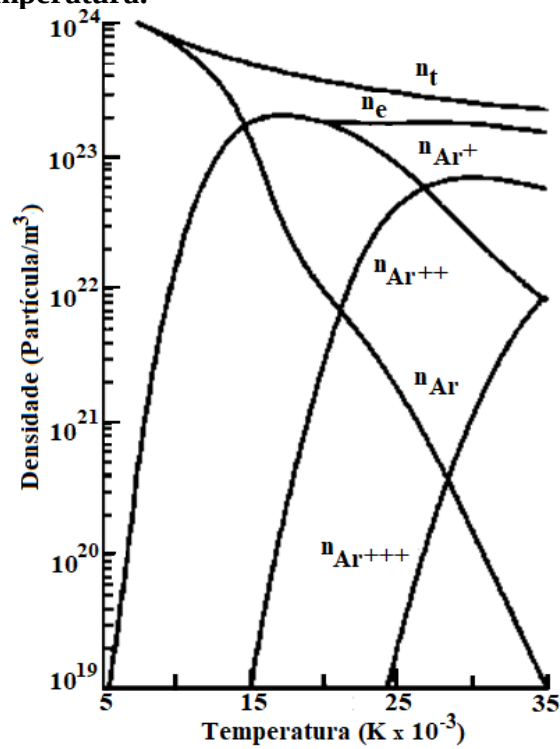
Tabela 2-1: Potencial de ionização de gases e vapores metálicos em elétron volts (eV).

Elemento	Potencial de Ionização (eV)					
	Estágio de ionização*					
	I	II	III	IV	V	VI
Alumínio	5,984	18,823	28,44	119,96	153,77	190,42
Argônio	15,755	27,62	40,90	59,79	75,0	91,3
Carbono	11,264	24,376	47,864	64,476	391,986	498,84
Hélio	24,580	54,40				
Ferro	7,90	16,18	30,64			
Magnésio	7,644	15,03	80,12	109,29	141,23	186,86
Nitrogênio	14,54	29,605	47,426	77,450	97,863	551,92
Tungstênio	7,94					

*Os algarismos romanos indicam o número de elétrons que são perdidos no estado de ionização indicado. **FONTE: LANCASTER, 1986 (Modificado).**

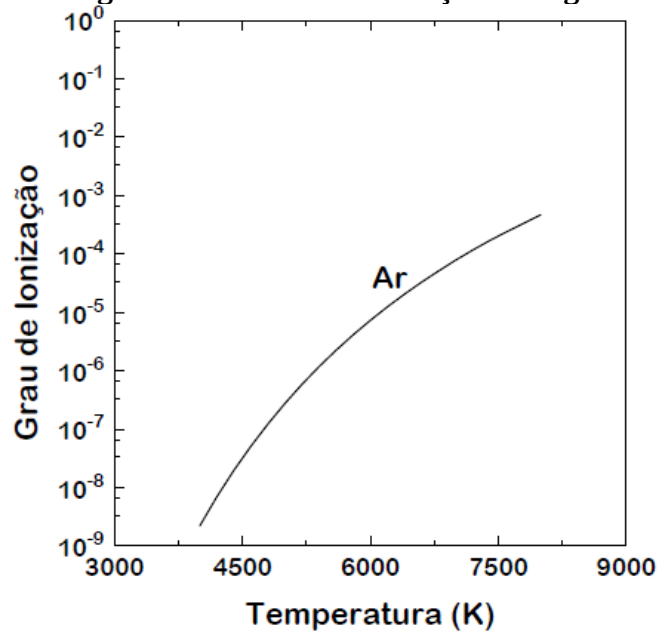
A composição de equilíbrio do plasma de argônio é apresentada na Figura 2.5, e a Figura 2.6 mostra o seu grau de ionização em função da temperatura. Um menor V_I resulta em um maior grau de ionização a uma dada temperatura. Como o número de portadores de carga é proporcional a α , plasmas contendo elementos de baixo V_I , como, por exemplo, vapores metálicos, podem, em princípio, manter um grau de ionização suficiente para manter a corrente de soldagem a temperaturas mais baixas. Isto se traduz, em geral, em uma melhor estabilidade, maior facilidade de abertura do arco e em menores tensões de operação para um dado comprimento do arco.

Figura 2.5 - Composição do plasma de argônio em função da temperatura.



FONTE: LANCASTER, 1994.

Figura 2.6 - Grau de ionização do argônio.



FONTE: MODENESI, 2014 (Modificado).

Deve-se enfatizar, todavia que o comportamento global do arco depende de diversos outros fatores além do potencial de ionização, como, por exemplo, as condições de dissipação de energia no arco e as características das regiões de queda (LANCASTER, 1994).

2.3. Fluxo de Calor na Soldagem

Nos processos de soldagem a arco há transferência de energia, que permite fundir o material base. A quantidade de energia imposta pelo arco elétrico determina o volume da poça de fusão, sua solidificação, a distribuição de calor e a taxa de aquecimento e resfriamento do material (ARAÚJO, 2008).

Esse fato é importante, pois a imposição de calor no material pode causar dimensionais e alterações microestruturais localizadas no material, podendo resultar em efeitos indesejados, como mudanças nas propriedades mecânicas, físicas, distorções, tensões residuais e formação de trincas (ARÉVALO, 2011).

A energia de soldagem, definida pela Equação 2.8, é um dos principais parâmetros utilizados no fluxo de calor, a qual é total por unidade de comprimento da solda.

$$E_S = \frac{P_{inst}}{v_S} = \frac{U \cdot I}{v_S} \quad \text{Eq. 2.8}$$

Para determinar o valor da energia de soldagem, é primordial o cálculo da potência elétrica. Em uma abordagem feita por BOSWORTH (1991), o autor afirma que a diferença dos métodos de cálculo, para a potência elétrica de soldagem, pode chegar a uma diferença de 30%, afetando em iguais proporções o rendimento térmico do processo. Assim, ele sugere que a potência elétrica de soldagem deva ser medida com a potência instantânea média (P_{inst}), que é 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.

$$P_{inst} = \frac{\sum_{i=1}^n (U_i \cdot I_i)}{n} \quad \text{Eq. 2.9}$$

Nem toda a energia ou calor gerado pelo arco é transferido para a peça, ou seja, a transferência não é perfeita, apresentando-se perdas por radiação, convecção, condução (MESSLER, 1991). A relação entre o calor entregue à peça e a energia de soldagem é denominada rendimento térmico (η), definido pela Equação 2.10. Ressalta-se que, na literatura, podem-se encontrar diversas formas, para indicar esta relação, como eficiência térmica, eficiência do processo ou rendimento térmico, mas todas fazem referência à mesma relação.

$$\eta = \frac{Q_{Imp}}{E_s} \cdot 100\% \quad \text{Eq. 2.10}$$

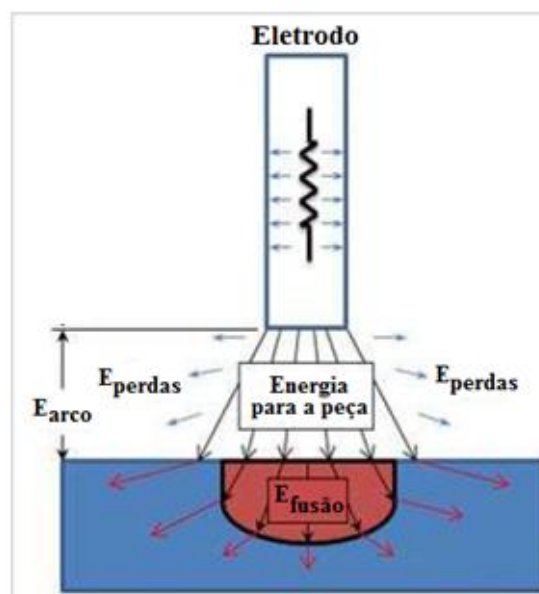
DUPONT e MARDER (1995) descreveram o rendimento térmico do processo de soldagem em duas formas, rendimento do arco (porção quantitativa de energia do arco transferida para o material base) e rendimento de fusão (porção de energia utilizada para a fusão do material base). DUPONT e MARDER (1995), baseados no trabalho de NILES e JACKSON (1975), realizaram o balanço de energia total do processo de soldagem a arco, representado pela Figura 2.7 e expressa pela Equação 2.11.

$$E_{arco} = E_{perdas} + E_{fusão} \quad \text{Eq. 2.11}$$

Em que E_{arco} representa a energia gerada pelo arco, E_{perdas} a energia perdida para o ambiente, $E_{fusão}$ a energia efetivamente gasta para fundir o metal base.

De acordo com esses mesmos autores, a maioria da energia total é fornecida pelo arco de soldagem. Por sua vez, a energia gerada pelo arco (E_{arco}) é distribuída em duas formas, uma parte é perdida para o ambiente (E_{perdas}) e o restante vai para o metal-base.

Figura 2.7 - Esquema da distribuição de energia na soldagem a arco para o processo GTAW.



FONTE: DUPONT e MADER, 1995 (Modificado).

Vários autores têm quantificado a energia imposta no processo de soldagem com métodos experimentais e com o uso de calorímetros (LU e KOU, 1989; ARÉVALO, 2011, PEPE, 2010, SGARBI, 2013). Os calorímetros utilizados, no estudo térmico de processos de soldagem,

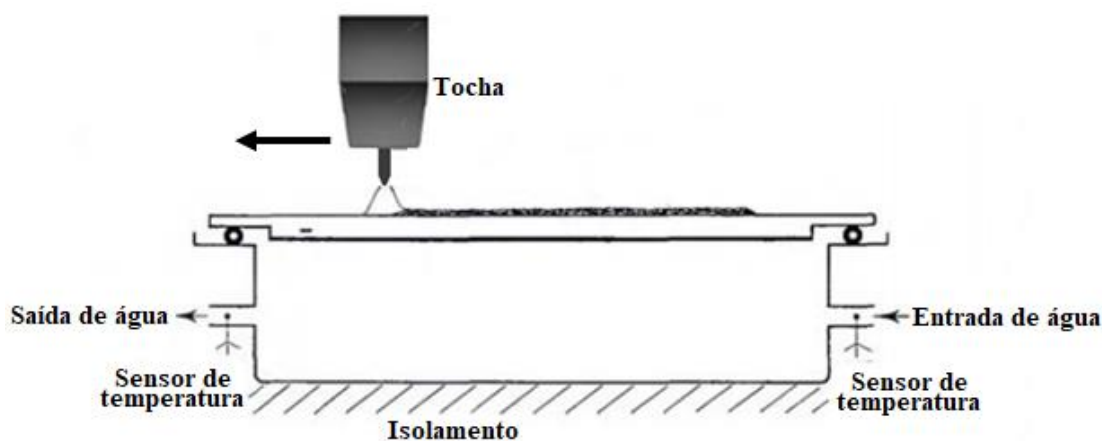
compreendem uma ampla gama de tipos. Na seção a seguir, pretende-se apresentar, de forma geral, calorímetros que têm sido usados para o estudo do rendimento térmico nos processos de soldagem.

2.3.1. Calorímetro de Água

Um dos mais difundidos calorímetros que foi utilizado, para a avaliação do rendimento térmico, 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 em que seria realizada a soldagem exposta ao ambiente. A água era continuamente misturada por agitação, para garantir a homogeneização da temperatura, no interior do calorímetro, que foi monitorada durante todo o processo.

LU e KOU (1989), diferente 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.

Figura 2.8 - Calorímetro com fluxo contínuo de água.



FONTE: LU e KOU, 1989 (Modificado).

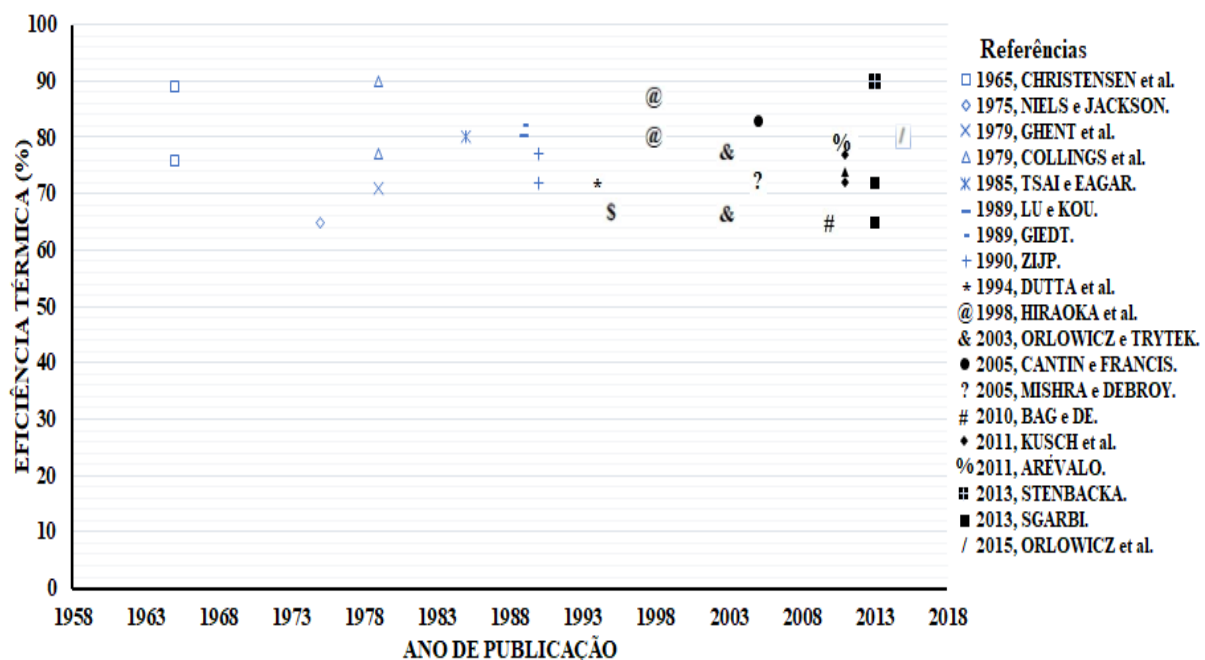
Alguns outros tipos de calorímetros são encontrados na literatura, como, por exemplo, o de efeito Seebeck (GIEDT et. al, 1989), de caixa isolada (CANTIN e FRANCIS, 2005; PEPE et. al, 2011) e de nitrogênio líquido (ARÉVALO, 2011).

2.3.2. Valores de Rendimento Térmico Obtidos em Estudos Anteriores

Para serem utilizados como referência, para as atividades experimentais desenvolvidas neste trabalho, foi realizado um levantamento dos valores de rendimento térmicos que foram obtidos por outros autores. Os resultados atingidos pelos diferentes estudos são apresentados na Tabela 2.2. Os dados estão organizados conforme as características construtivas do calorímetro e os parâmetros de soldagem.

Como pode ser observado na Tabela 2.2, o rendimento térmico nos diferentes experimentos variou significativamente. Foi realizado um levantamento dos resultados alcançados por diferentes autores para o rendimento térmico no processo de soldagem GTAW. Na Figura 2.8 pode-se observar o gráfico plotado com as informações buscadas na literatura. Os dados foram apresentados, conforme o ano de publicação, sendo possível ressaltar uma grande dispersão entre os resultados. Essas variações, nos valores de rendimento térmico, estão ligadas aos parâmetros operacionais de soldagem utilizados e, no caso de calorímetros do tipo fluxo contínuo de água, aos sensores de temperatura e vazão, material-base empregado na produção do calorímetro, forma de aquisição e determinação dos dados medidos e vazão e geometria da região de entrada e saída da água no calorímetro (LU E KOU, 1989; HACKENHAAR E MAZZAFERRO, 2016).

Figura 2.9 - Eficiência térmica média do processo de soldagem GTAW reportada por diversos autores.



FONTE: O AUTOR.

Tabela 2-2: Resultados encontrados na literatura de eficiência térmica do processo GTAW para diferentes calorímetros.

Condições de Soldagem	Tipo de Calorímetro	Eficiência Térmica
Eletrodo: W+2%Th, Diam.: 4mm, Ângulo: 60° Polaridade: Direta (negativa) Gás: Ar 100% Corrente: 250-300A, Tensão: 15-16V Veloc. Soldagem: 42cm/min Comprimento do arco: 6mm Material Base: ASTM A36	Calorímetro por efeito Seebeck (DUPONT e MARDER, 1995)	67% ± 5%
Eletrodo: W+2%Th, Diam.: 3,2mm, Ângulo: 60° Polaridade: Direta (negativa) Gás: Ar 100%, He 100% e misturas cada 25% Corrente: 100 e 200A Veloc. Soldagem: Não aplica Comprimento do arco: 1 a 6mm (cada 1mm) Material Base: Cobre	Calorímetro de fluxo contínuo de água (HIRAOKA et al, 1998)	(He 100%) (Ar 100%) 80 - 87%
Eletrodo: W+2%Th, Diam.: 3,2mm, Ângulo: 60° Polaridade: Direta (negativa) Gás: Ar 100% (10L/min) Corrente: 100A Veloc. Soldagem: não aplica processo estático Comprimento do arco: 1 a 7mm (cada 1mm) Material Base: Cobre, #2, 5 e 10mm	Calorímetro de fluxo contínuo de água (ZIJP, 1990)	72 - 77%
Eletrodo: W+2%Th, Diam.: 2,4 e 3,2mm Ângulo: 90° Polaridade: Direta (negativa) Gás: Ar 100% (15L/min) Corrente: 50 a 200A (cada 50A) Veloc. Soldagem: 5cm/min Comprimento do arco: 3mm Material Base: Aço inoxidável 304L, #12,7mm	Calorímetro efeito Seebeck (GIEDT et al, 1989)	80 - 82%
Eletrodo: W+2%Ce, Diam.: 2,4-3,2-4,8-8-10mm Ângulo: 90° Polaridade: Direta, inversa e AC Gás: Ar 100%, He 100% e 75% He e 25 Ar (20L/min) Corrente: 100 e 200A Veloc. Soldagem: 10cm/min Comprimento do arco: 2 e 4mm Material Base: Alumínio 1350, #110mm	Calorímetro por condução (CANTIN e FRANCIS, 2005)	DCEN 76 - 89% DCEP 55 - 60% AC 65 - 83%

FONTE: ARÉVALO, 2011 (Modificado).

Segundo STENBACKA (2013), as variações nos valores do rendimento térmico dos processos de soldagem estão ligadas ao material utilizado no calorímetro (anodo), apresentando-se, na Tabela 2-3, os valores obtidos por outros autores.

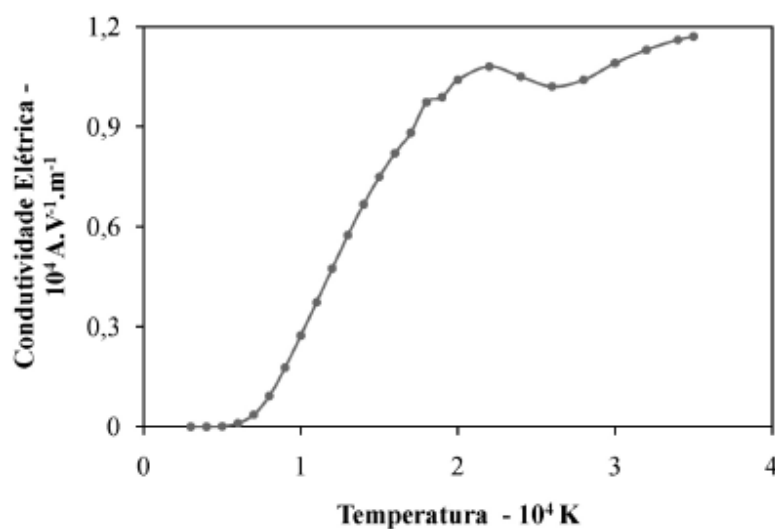
Tabela 2-3: Resultados de estudos sobre eficiência térmica do processo de GTAW recolhidos pelo autor STENBACKA (2013).

Material	Eficiência - η (%)
Ferro Armco	60-78
Ânodo de cobre	80-90
Aço	58-83
Aço inox laminado	77-90
Aço Inox 360L	79-84
Aço inox e Ni200	80-85
Aço A36	62-72
Ferro fundido modular	66-77

2.4. Propriedades do Argônio em Função da Temperatura

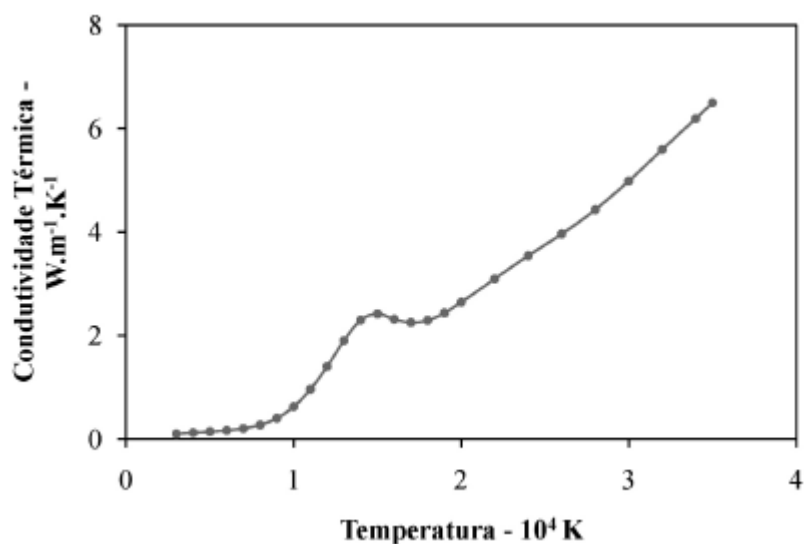
As propriedades termodinâmicas (densidade, calor específico) e coeficientes de transporte (condutividade térmica, condutividade elétrica, viscosidade) do gás são de fundamental importância para o desenvolvimento de modelos matemáticos que descrevem o comportamento do plasma. Estas propriedades são fortemente dependentes da temperatura do gás e podem ser calculadas ou adquiridas experimentalmente. As Figuras 2.10, 2.11, 2.12 e 2.13 apresentam, respectivamente, a condutividade elétrica, condutividade térmica, a viscosidade e a densidade, todas em função da temperatura, para o gás argônio (LANCASTER, 1994; BOULOS, FAUCHAIS e PFENDER, 1994).

Figura 2.10 – Condutividade elétrica em função da temperatura para o argônio.



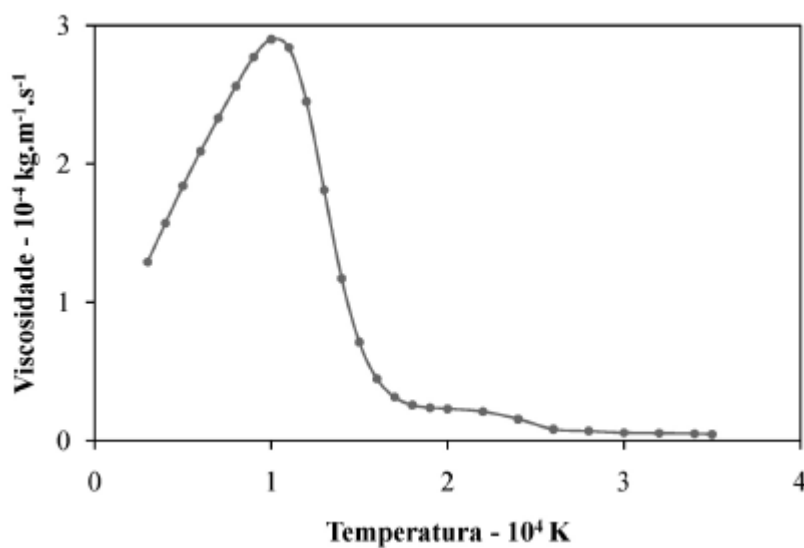
FONTE: LANCASTER, 1994.

Figura 2.11 – Condutividade térmica em função da temperatura para o argônio.



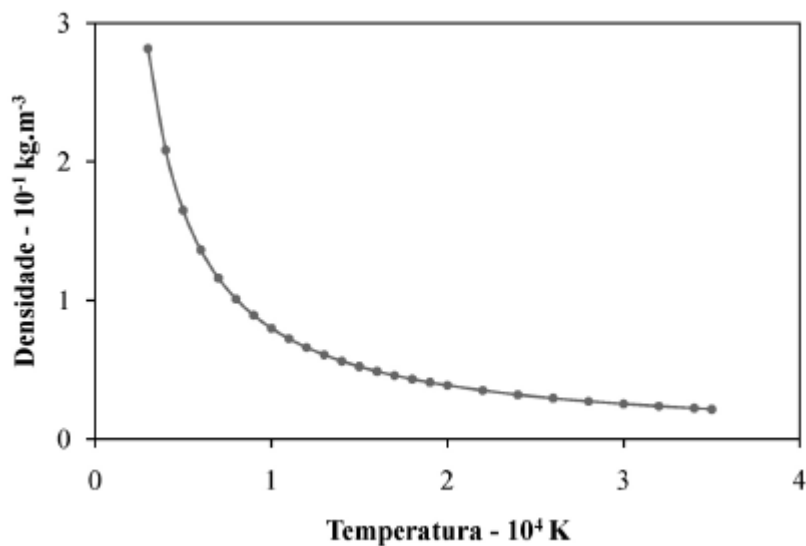
FONTE: LANCASTER, 1994.

Figura 2.12 – Viscosidade em função da temperatura para o argônio.



FONTE: LANCASTER, 1994.

Figura 2.13 – Densidade de massa em função da temperatura para o argônio.



FONTE: LANCASTER, 1994.

3. MATERIAIS e MÉTODOS

3.1. Materiais e Equipamentos

- Fonte de soldagem (Kemppi Minarc Evo 180).
- Eletrodos de tungstênio puro.
- Gás (Argônio).
- Sistema de aquisição de dados de soldagem SAP-V4 da IMC Soldagem.
- Bloco de cobre refrigerado à água.
- Termômetro digital Minipa MT-455 com termopar tipo K.
- Câmera digital cânon I3.
- Luxímetro Digital Minipa MLM-1020.
- Chapas de aço SAE 1020.

3.2. Métodos

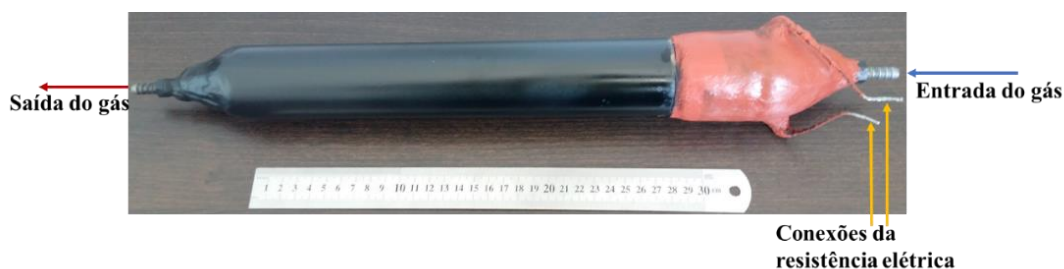
Uma temperatura de aquecimento do gás foi limitada pelos materiais disponíveis, para a montagem da tocha de soldagem GTAW e do aquecedor, tendo como intuito a sua proteção e a sua não deterioração durante a realização dos testes. Foram realizadas medidas dos valores de tensão de operação, perfil do arco e luminosidade emitida, para o gás sem e com aquecimento.

Um calorímetro de fluxo contínuo de água foi desenvolvido, buscando-se estimar o rendimento térmico do processo, representando, assim, o calor que foi realmente transferido para a peça, quando o gás foi aquecido.

Soldas foram realizadas sobre chapas de aço carbono com o objetivo de determinar sua penetração e largura para o gás em diferentes temperaturas.

3.3. Sistemas de Aquecimento por Resistência Elétrica

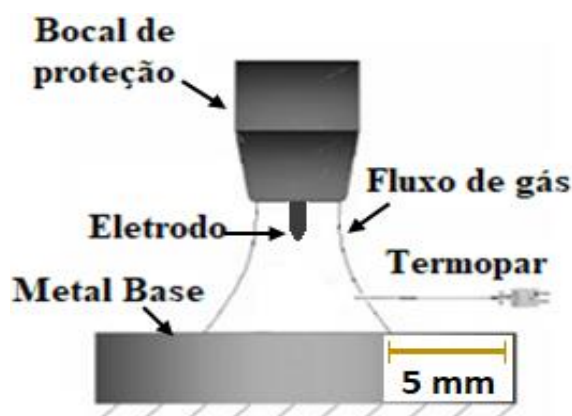
Para realizar o aquecimento do gás, foi desenvolvido um sistema por resistência elétrica que permitiu a manutenção e baixas alterações de sua temperatura (variação máxima entre ensaio de $\pm 5^{\circ}\text{C}$) durante a realização de todos os testes. A Figura 3.1 apresenta o sistema de aquecimento do gás de proteção, sendo detalhada toda a montagem e materiais utilizados no Anexo 1.

Figura 3.1 – Sistema desenvolvido para o aquecimento do gás de proteção.

O monitoramento da temperatura de saída do gás foi desenvolvido com um termômetro digital da marca Minipa e modelo MT-455. Esse termômetro apresenta precisão de $\pm 0,1\%$, ou seja, de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ para a faixa de -60°C a 1372°C .

O termopar utilizado no termômetro foi do tipo K com precisão de $\pm 0,75\%$ na leitura, ou seja, de $\pm 2,2^{\circ}\text{C}$.

O posicionamento, para a medida da temperatura, está esquematizado na Figura 3.2, demonstrando que o termopar foi colocado diretamente no fluxo do gás, antes da abertura do arco, sem que ocorresse o contato ou interferência de quaisquer outras partes da tocha. Esse monitoramento da temperatura foi executado antes da realização de todos os experimentos propostos neste trabalho.

Figura 3.2 - Esquema do posicionamento do termopar para medida da temperatura do gás em relação à tocha GTAW.

3.4. Estudo do Arco Elétrico

A bancada utilizada e todos os equipamentos empregados, para a materialização do estudo do arco elétrico, estão apresentados na Figura 3.3.

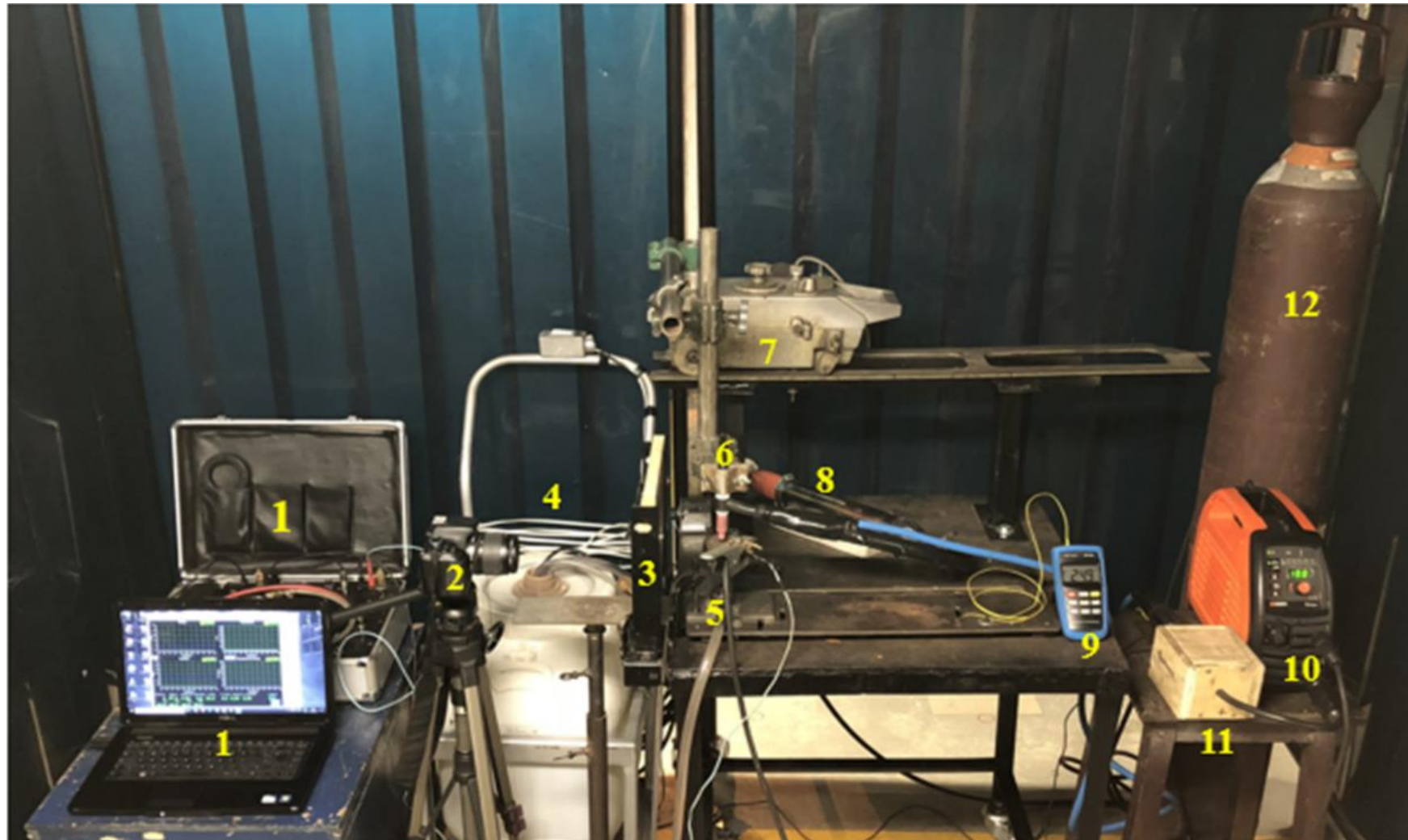
Neste estudo, foi utilizado o mesmo posicionamento da tocha de soldagem para a medida dos valores de tensão-corrente, imagens do arco e luminosidade. Em todos os casos, a abertura do arco foi realizada por toque, a vazão do gás medida com um bibímetro e o ângulo de afiação do eletrodo conferido com auxílio de um goniômetro.

Antes da aquisição dos valores de tensão-corrente, imagens do arco e luminosidade, aguardou-se um tempo de, aproximadamente, 5 segundos, após a abertura do arco elétrico, para a sua estabilização. Em seguida, esses valores foram obtidos durante um tempo de 15 segundos.

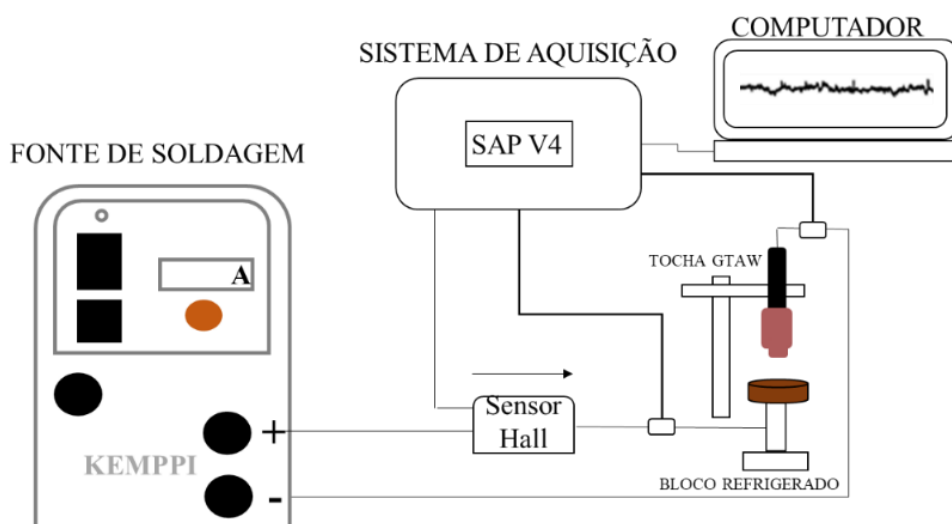
3.4.1. Sistema de Aquisição de Dados

Utilizou-se um sistema de aquisição de dados de soldagem fabricado por IMC SOLDAGEM, modelo SAP V4 (devidamente calibrado pelo fabricante), em conjunto com o software SapTiV4.37s do mesmo fabricante, empregando-se, na visualização e coleta dos sinais, durante o processo de soldagem e a exportação dos dados, para um arquivo tipo texto. Foram alcançados sinais com uma taxa de amostragem de 5000 Hz. A Figura 3.4 representa o diagrama geral das conexões no arranjo do estudo.

Para a medição da corrente de soldagem, foi utilizado um sensor Hall tipo janela LEM, modelo HAT 200-S, com uma faixa de medição de -600 a 600A e sinal na saída de $\pm 4V$. Este equipamento é de uso comum em fontes para a aplicação em processos de soldagem. Já a medida da tensão do arco foi processada nos cabos de força (diferença de potencial entre o polo positivo e negativo), realizando as ligações o mais próximo possível das zonas anódica e catódica do arco, de forma a obter apenas a queda de tensão referente ao arco.

Figura 3.3 - Bancada de experimentos do arco elétrico.

Legenda: (1) Sistema de aquisição de dados; (2) Câmera; (3) Filtro luminoso; (4) Sistema de refrigeração do bloco; (5) Bloco de cobre refrigerado; (6) Tocha GTAW; (7) Dispositivo mecanizado de deslocamento e suporte regulável de altura da tocha; (8) Sistema de aquecimento do gás; (9) Termômetro digital com termopar; (10) Fonte de soldagem; (11) Sensor hall; (12) Cilindro de argônio.

Figura 3.4 - Diagrama esquemático para a aquisição de dados.

3.4.2. Aquisição da Curva Tensão-Corrente

Um dos objetivos da aquisição da curva tensão-corrente foi a reprodução da curva característica, apresentada pelos autores MARQUES e MODENESI (2015) (Figura 2.1), porém a variável neste trabalho foi a temperatura de saída do gás e não o comprimento do arco elétrico.

Neste estudo, foi utilizada uma temperatura de aquecimento do gás de proteção de 150°C e os valores medidos comparados ao gás em temperatura ambiente.

O procedimento de aquisição da tensão foi iniciado com corrente de 150A e as posteriores em intervalos de 10A até o valor final de 10A.

Na Tabela 3-1 estão apresentadas as condições empregadas e, em todo o estudo, operou-se com o processo de soldagem GTAW. Os parâmetros utilizados foram definidos pelos melhores resultados apresentados nas soldas produzidas neste trabalho.

A corrente de operação adotada, para início de cada ensaio, foi considerada pela apresentada no sensor da fonte de soldagem (corrente nominal), porém a usada, para a determinação dos resultados, foi a obtida pelo sistema de aquisição de dados (corrente medida).

Os eletrodos com adição de óxido proporcionaram redução em seu consumo e melhora na abertura e estabilidade do arco elétrico (LANCASTER, 1994). Por tais motivos, neste trabalho, utilizaram-se eletrodos de tungstênio puro (EWP), pois possibilitaram uma melhor observação na ocorrência de variações significativas nesses fatores quando o gás foi aquecido.

Tabela 3-1: Condições utilizadas para a aquisição das curvas características do arco elétrico GTAW.

Comprimento do arco	Eletrodo			Bocal	Gás	
4mm	Ângulo de Afiação	Diâmetro	Tipo		Temperatura	Vazão
	60°	1,6mm	EWP	4	Ambiente 150°C	6l/min
Corrente Nominal (A)						
10	20	30	40	50	60	70
90	100	110	120	130	140	150

3.4.3. Imagens do Arco Elétrico

Perfis do arco elétrico foram observados, utilizando-se uma câmera Cânon I3, disposta em um tripé próprio, o que ocasionou o mesmo posicionamento para a aquisição de todas as imagens.

As aquisições das imagens seguiram os cuidados apresentados na literatura e expressos por VILARINHO (2009), como, por exemplo, o mesmo posicionamento da câmera, para a aquisição das imagens e utilização de filtro, para a proteção contra a luminosidade gerada pelo arco.

O procedimento adotado foi iniciado com o posicionamento da câmera, em uma distância fixa, em relação ao bloco refrigerado (30cm), em que o arco foi aberto e mantido. Medidas como o comprimento do arco (4mm) e a exposição do eletrodo, em relação ao bocal (2mm), foram ajustadas com auxílio de um padrão pré-avaliado com um paquímetro, para que, em todos os ensaios, não ocorressem variações significativas impostas por outros parâmetros que não fosse a temperatura do gás.

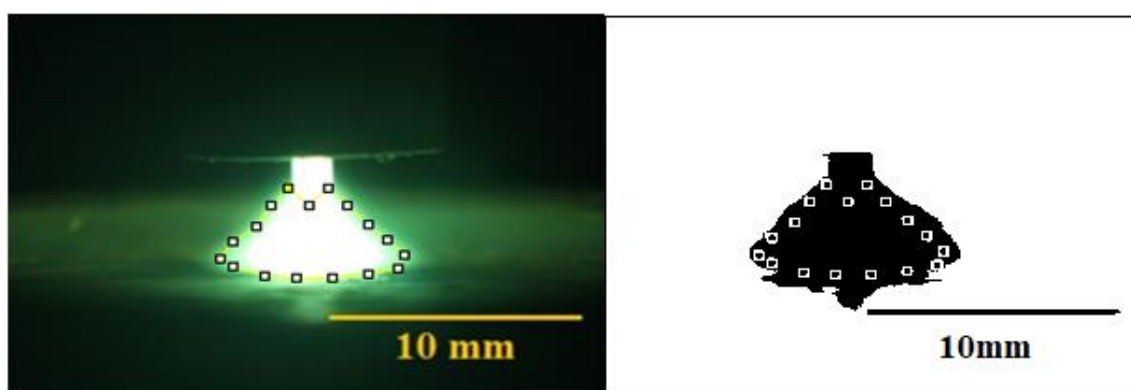
Para proteger a câmera da alta luminosidade gerada pelo arco, foi utilizado um filtro de luz para máscara de solda nível 14. Esse filtro também foi posicionado e fixado a uma distância atribuída antes dos ensaios e inalterada, durante toda sua realização, sendo de 20cm da câmera e 10cm do bloco refrigerado.

Com o objetivo de melhorar a aquisição das imagens, foram adicionadas lentes de aumento à câmera que propiciou uma ampliação de sete vezes.

Para a metodologia de aquisição das imagens, foram definidas as correntes de soldagem que variaram dentro do intervalo de 10A a 150A. A variação entre cada aquisição foi de 20A, em virtude da maior modificação no aspecto do arco elétrico entre cada imagem obtida. Além disso, foi determinada a afiação do eletrodo a cada aquisição das imagens.

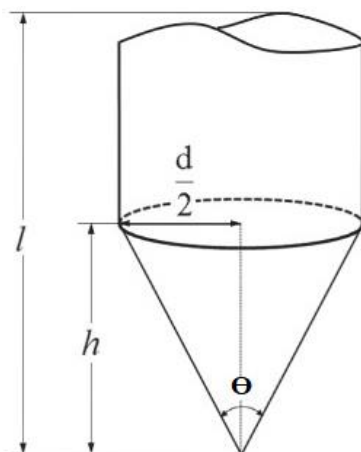
As imagens obtidas neste procedimento foram transportadas ao software livre ImageJ, para se mensurar a área do arco e relacionar os resultados para as diferentes temperaturas do gás. A metodologia de medida dessas áreas seguiu a delimitação da região do arco ponto a ponto (Figura 3.5), sendo fornecidos pelo software os valores das áreas. Juntamente com essa metodologia apresentada, foi utilizado, também, o procedimento *Threshold* do mesmo software, para que fossem comparados os valores e os erros fossem reduzidos de medida (basicamente, define-se a região a ser analisada e separa as regiões de cores diferentes em escalas de preto e branco).

Figura 3.5 - Esquema para medida da área do arco utilizando o software ImageJ. (a) Metodologia ponto a ponto e (b) *Threshold*.



Para ambas as metodologias de medições da área do arco elétrico, foi decrescido o valor da área do eletrodo, calculado como apresentado esquematicamente na Figura 3.6.

Figura 3.6 – Representação de um eletrodo afiado com ângulo Θ , cuja área assumida para emissão é a área lateral de um cone de base circular.



Para cada corrente, foram realizadas três aquisições de imagens, medidas as suas áreas, tirando-se uma média dos valores obtidos e avaliando-se os erros de medidas.

Os parâmetros utilizados foram os mesmos adotados, para a aquisição das curvas tensão-corrente, apresentados na seção 3.4.2 (Tabela 3-1).

3.4.4. Luminosidade

Para a realização deste experimento, foi utilizado um luxímetro digital da marca Minipa modelo MLM-1020. O aparelho é acompanhado pelo software responsável pela aquisição dos dados, os valores obtidos são representados na unidade lux e o intervalo de aquisição foi de um ponto a cada segundo. A precisão relativa da aquisição é de $\pm 0,75\%$ na leitura, ou seja, de $\pm 3\%$, dado fornecido pelo fabricante.

Para este ensaio, construiu-se um apoio de madeira para o luxímetro, que foi posicionado a uma distância fixa do arco elétrico (6cm) e protegido por um filtro de luz para a máscara de solda nível 6 que foi inserida no apoio de madeira do luxímetro. A montagem da região de posicionamento do luxímetro e bloco refrigerado de cobre é mostrada na Figura 3.7.

Objetivando-se ter uma média entre os valores de luminosidades obtidos, realizaram-se três ensaios para cada corrente estabelecida.

Os parâmetros e variáveis utilizados, para a execução dos ensaios, são apresentados na Tabela 3-2. Estes valores foram determinados em relação às análises do arco elétrico.

Antes de cada ensaio, o eletrodo foi afiado e observou-se que a luminosidade mostrada no aparelho foi sempre zero (tendo como objetivo a avaliação somente da luminosidade produzida pelo arco elétrico e de nenhuma outra fonte de luz externa presente durante a realização dos ensaios).

Tabela 3-2: Parâmetros da soldagem utilizados para aquisição da luminosidade.

Comprimento do arco		Eletrodo			Bocal	Gás	
		Ângulo de Afiação	Diâmetro	Tipo		Temperatura	Vazão
4mm		60°	1,6mm	EWP	4	Ambiente 150°C	6l/min
Corrente Nominal (A)							
10	20	30	40	50	60	70	80
90	100	110	120	130	140	150	

Figura 3.7 - Montagem para aquisição da luminosidade do arco elétrico.



Legenda: (1) Tocha GTAW; (2) Alicate terra; (3) Bloco de cobre refrigerado; (4) Apoio de madeira; (5) Luxímetro (6) Região de posicionamento do filtro luminoso.

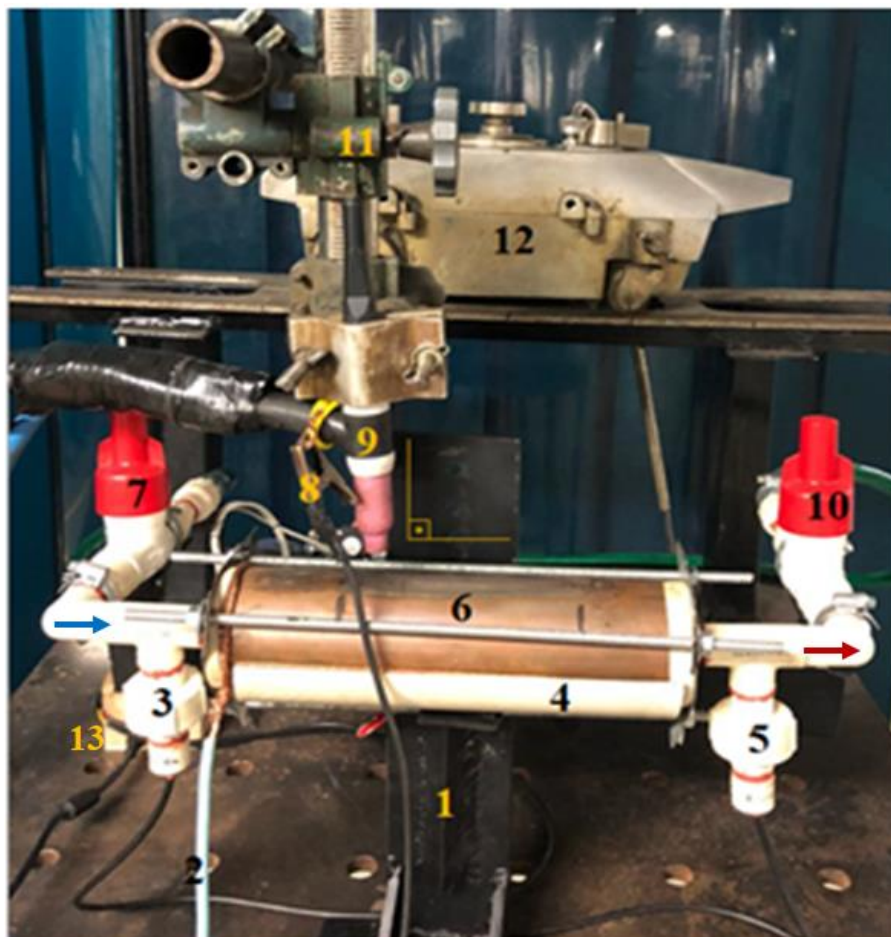
3.5. Calorimetria

O calorímetro utilizado neste trabalho seguiu o princípio proposto por LU e KOU (1989) e semelhante ao que foi empregado no trabalho de SGARBI (2013) de fluxo contínuo de água, apresentado na Figura 3.8.

Toda a montagem do calorímetro, matérias utilizadas e suas especificações são apresentadas no Anexo 3.

Para a realização deste estudo, os mesmos procedimentos adotados na seção 3.4, para a abertura do arco, medida da vazão do gás e o ângulo de afiação do eletrodo, foram seguidos (toque, bibímetro e goniômetro, respectivamente).

Figura 3.8 - Calorímetro de fluxo contínuo desenvolvido para a análise da eficiência térmica de processos de soldagem.



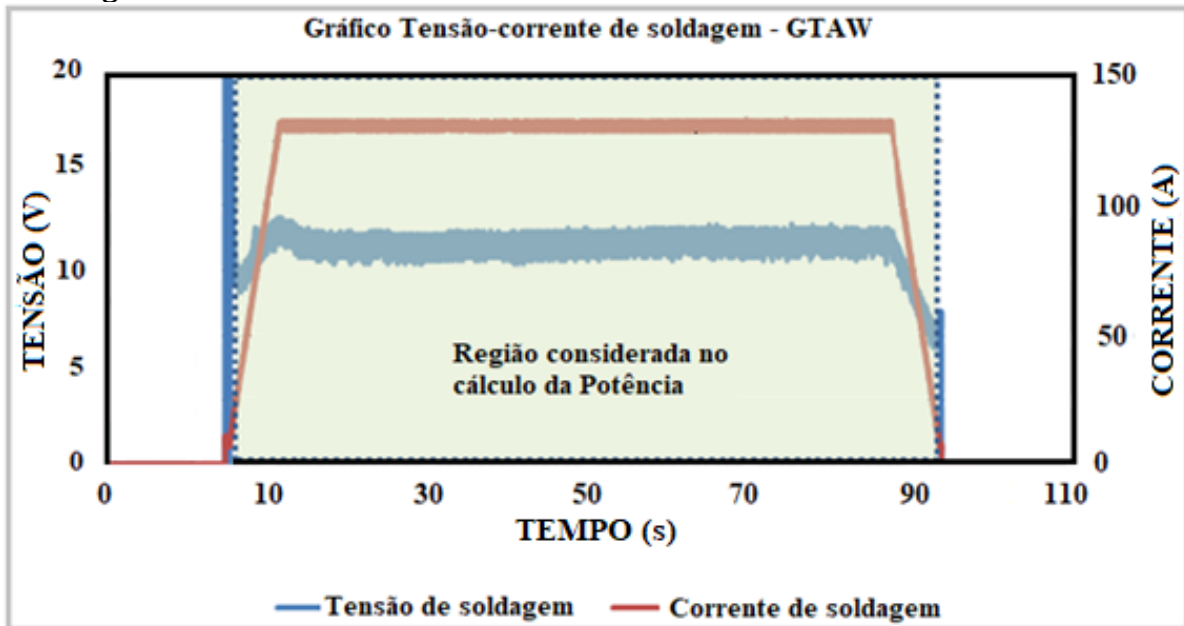
Legenda: (1) Suporte fixador do calorímetro. (2) Conexão do alicate terra. (3) Sensor de temperatura de entrada. (4) Isolamento térmico. (5) Sensor de temperatura de saída. (6) Tubo de cobre. (7) Registro de vazão (entrada). (8) Conector do sistema de aquisição I. (9) Tocha GTAW. (10) Registro de vazão (saída). (11) Suporte regulador de altura da tocha. (12) Sistema mecanizado de deslocamento. (13) Placa Arduino.

3.5.1. Metodologia de Cálculo da Potência Elétrica

Conforme a revisão apresentada neste trabalho, um dos métodos recomendados, para o cálculo da potência elétrica do arco, é a utilização da potência instantânea média, uma vez que este método leva em consideração as variações que ocorrem na corrente e na tensão durante o processo de soldagem.

Neste estudo, foi empregada a Equação 2.9 (seção 2.3), para se obter a potência elétrica do arco, a partir dos dados registrados pelo sistema de aquisição, durante o monitoramento do processo de soldagem, sendo apresentada na Figura 3.9 a curva para o processo GTAW.

Figura 3.9 - Curvas típicas de tensão e corrente de soldagem para o processo de soldagem GTAW.



Como pode ser observado na Figura 3.9, para o cálculo da potência elétrica do arco, 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.

O tempo de soldagem (t_s) foi medido com auxílio do gráfico apresentado na Figura 3.9, sendo considerado o momento em que o arco elétrico foi aberto até o seu fechamento. Com o valor de t_s , foi determinado o comprimento da solda (L_s), já que a velocidade de soldagem (v_s) foi sempre constante durante a realização dos testes.

3.5.2. Metodologia de Cálculo da Energia de Soldagem

A energia de soldagem foi calculada conforme Equação 2.8. Utilizou-se a potência elétrica, calculada de acordo com as considerações da seção anterior, e a velocidade de soldagem regulada no equipamento durante os experimentos.

3.5.3. Metodologia para a Obtenção do Aporte Térmico

O aporte térmico foi obtido com o uso dos princípios de calorimetria. Para o calorímetro utilizado neste trabalho, a energia entregue ao corpo de prova foi obtida com a Equação 3.1.

$$Q_a = \int_0^t \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_s - T_e) \cdot dt \quad \text{Eq. 3.1}$$

O calor específico e a densidade são propriedades tabeladas da água que variam juntamente com a temperatura. Por simplificação, estas propriedades foram consideradas constantes em decorrência das pequenas variações sofridas em seus valores, durante a realização dos ensaios, utilizando-se os valores tabelados na temperatura de entrada da água no calorímetro (T_e) de cada ensaio. A vazão de água permaneceu constante, durante a realização dos experimentos, desse modo, a Equação 3.1 ficou:

$$Q_a = V_{H_2O} \cdot \rho \cdot c_p \cdot \int_0^t (T_s - T_e) \cdot dt \quad \text{Eq. 3.2}$$

A integral da variação de temperatura, no intervalo de tempo analisado, equivale à área sob o gráfico do sinal obtido com o monitoramento da temperatura da água do calorímetro.

3.5.4. Procedimento Experimental dos Ensaios de Calorimetria

Antes de iniciar os experimentos, os sensores de temperatura foram calibrados e conferidos por comparação com o sistema de aquisição de dados da IMC Soldagem e com um termômetro digital. Para a calibração do fluxômetro, utilizaram-se bombas com valores de vazão água determinados pelo fabricante.

Nos experimentos de calorimetria com o gás de proteção aquecido, foi aguardado que se atingisse o valor de 150°C antes do posicionamento da tocha sobre o corpo do calorímetro. Após alcançar essa temperatura, procedeu-se de imediato à abertura do arco elétrico e ao início da aquisição das medidas.

Para cada situação, ou seja, corrente de soldagem e temperatura do gás, foram realizadas cinco análises de calorimetria, o que produziu um total de vinte ensaios.

Os parâmetros utilizados nos testes de calorimetria são apresentados na Tabela 3-3, sendo efetuada, em todas as medidas, a calha de isolamento descrita no Anexo 3, corrente contínua com eletrodo negativo e velocidade de soldagem de 1,75mm/s.

Para observar somente a energia cedida pelo gás, quando aquecido, simulou-se uma soldagem sem a abertura do aro elétrico.

Tabela 3-3: Experimentos propostos para o processo de soldagem GTAW.

Comprimento do Arco	Eletrodo		Bocal	Gás		Temperatura do Gás (°C)	
4mm	Ângulo de afiação 60°	Diâmetro 1,6mm	Número 4	Tipo Argônio	Vazão 6l/min	Ambiente	150
Correntes de Soldagem (A)							
100				120			

3.6. Soldagem

Este estudo foi contemplado para avaliar o efeito do aquecimento do gás na morfologia das soldas produzidas. Para tanto, executaram-se soldas sobre chapa com o processo GTAW sem a adição de material.

A bancada de experimentos, para o processamento das soldas, apresentou similaridades com a do estudo do arco, porém algumas modificações foram feitas, como a fixação da tocha GTAW e a movimentação da chapa-teste, como se pode observar na Figura 3.10. Essa montagem proporcionou o mesmo posicionamento da tocha em relação às chapas durante a concretização de todas as soldas. A velocidade de soldagem foi mantida sempre constante, utilizando-se, para isso, um dispositivo mecanizado de deslocamento controlado.

Realizou-se juntamente com as soldas o monitoramento da tensão-corrente com o auxílio do sistema de aquisição de dados apresentado na seção 3.4.2.

O metal-base utilizado, para a efetivação das soldas, foi um aço SAE 1020 de composição química, apresentado na Tabela 3-4.

Tabela 3-4: Composição química especificada do metal-base utilizado no estudo.

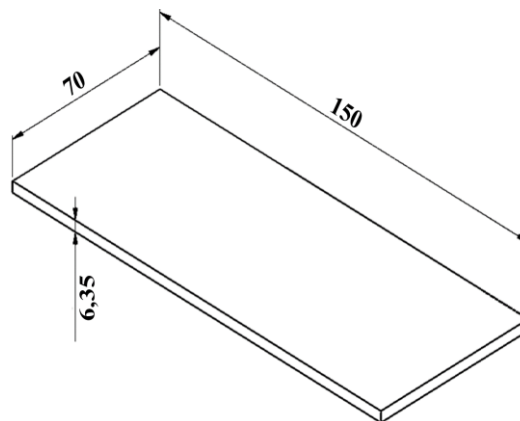
C	Mn	P máx.	S máx.
0,18-0,23	0,30-0,60	0,040	0,050

As dimensões dos corpos de provas para as soldagens estão apontadas na Figura 3.11, utilizando-se chapas de espessura igual a ¼ de polegadas (6,35mm).

Antes da realização das soldas, as chapas foram limpas, usando-se jato abrasivo e, posteriormente, o disco de esmerilhamento do tipo flap.

Figura 3.10 - Bancada de experimentos utilizada para as soldagens.

Legenda: (1) Suporte fixador da tocha GTAW. (2) Tocha GTAW. (3) Conector I para aquisição de dados. (4) Chapa para ensaios de soldagem. (5) Mesa-base para posicionamento das chapas. (6) Conector II para a aquisição de dados. (7) Alicate terra. (8) Sentido de deslocamento da chapa para a soldagem. (9) Dispositivo mecanizado para deslocamento da chapa. (10) Suporte regulável de posicionamento da mesa-base.

Figura 3.11 - Corpo de prova para realização das soldas, medidas em mm.

3.6.1. Procedimento Experimental para a Soldagem

Para a produção das soldas, alguns dos parâmetros foram mantidos constantes, objetivando-se a avaliação do efeito da temperatura do gás para diferentes correntes de operação. Esses parâmetros estão apresentados na Tabela 3-5.

Tabela 3-5: Parâmetros da soldagem utilizados para a realização experimental.

Comprimento do Arco	Eletrodo		Bocal	Gás		Velocidade de Soldagem (mm/s)
4mm	Ângulo de afiação 60°	Diâmetro 1,6mm	Número 4	Tipo Argônio	Vazão 6l/min	0,75
Corrente de Soldagem (A)						
80	90	100	110	120	130	

Os parâmetros de soldagem foram definidos com a realização de soldas teses e as que melhor apresentaram aspecto visual e repetibilidade foram aquelas que determinaram esses parâmetros.

Para cada uma das correntes de soldagem, foram feitas três soldas, o que gerou um total de 36 amostras.

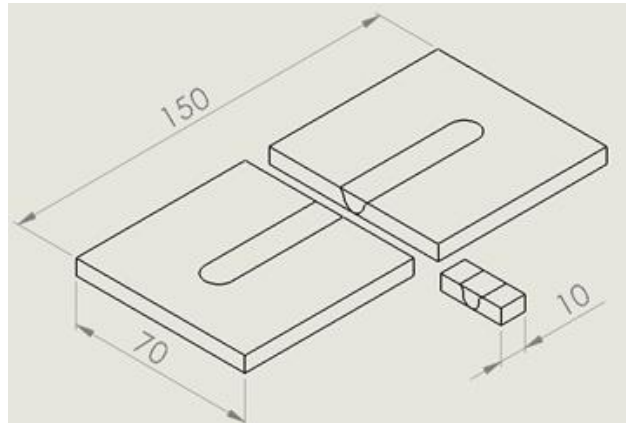
A abertura do arco elétrico foi mantida pelo toque, e o ângulo de afiação do eletrodo conferido com o auxílio de um goniômetro.

As caracterizações das soldas foram feitas por análise de macroestrutura, observando-se as mudanças na morfologia das soldas (largura e penetração).

3.7. Análise Macroestrutural

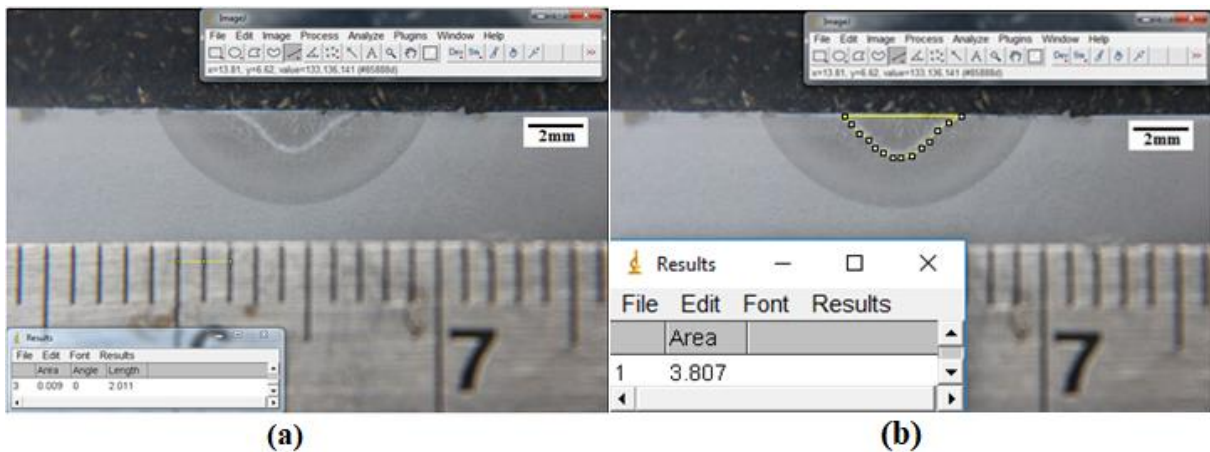
As amostras, para a análise de macroestrutura (penetração e largura), foram retiradas das soldas GTAW da região central dos cordões conforme indicado na Figura 3.12. Para a preparação destas amostras, seguiu-se o procedimento padrão metalográfico para soldas em aço carbono, ou seja, corte, embutimento, lixamento (com lixas de 80, 220, 400 e 600 mesh) e ataque químico com Nital 5%. Em seguida, fotografou-se a seção transversal dessas soldas com uma câmera digital da marca Cânon I3 e levou-se em consideração o uso de uma régua como escala.

Figura 3.12 - Posição de retirada das amostras das soldas para a realização das caracterizações.



As imagens fotografadas das soldas foram levadas ao software de domínio público ImageJ, onde foi introduzida uma barra de escala (Figura 3.13(a)) e medidos os valores de penetração, largura e área das soldas. Esta última medida foi consubstanciada pela metodologia de delimitação da região da solda ponto a ponto (Figura 3.13 (b)), similar ao procedimento utilizado na medida da área do arco elétrico discutido na seção 3.4.3.

Figura 3.13 – (a) Calibração da imagem e aplicação de escala. (b) Metodologia para a medida das áreas das soldas.



4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Estudo do Arco Elétrico

Calculou-se o grau de ionização, avaliando-se somente a temperatura de aquecimento do gás (150°C ou 423K). Para tanto, foi utilizada a Equação 2.7 da seção 2.3.1, observando-se apenas a contribuição da variação da temperatura do gás de proteção no valor do grau de ionização.

$$\frac{\alpha^2}{1 - \alpha^2} p/p_0 = 1,264 \cdot 10^{-6} (423)^{5/2} \left(2 + e^{-\frac{2062}{423}} \right) \cdot e^{-\frac{183 \cdot 10^3}{423}}$$

$$\frac{\alpha^2}{1 - \alpha^2} = 1,264 \cdot 10^{-6} \cdot 3,683 \cdot 10^6 \cdot (2 + 7,651 \cdot 10^{-3}) \cdot 1,515 \cdot 10^{-188}$$

$$\alpha = 1,043 \cdot 10^{-158}$$

Como o grau de ionização, para o gás de proteção sem aquecimento, foi de $4,74 \cdot 10^{-256}$, o ganho nesse valor, ao se processar o aquecimento do gás a 150°C, foi de aproximadamente $2,2 \cdot 10^{1080}\%$.

Esse aumento no valor do grau de ionização, ao se aquecer o gás de proteção, influenciou na ionização e condutividade elétrica da coluna do arco, já que um maior número de elétrons está disponível.

4.1.1. Curva Tensão-corrente

Os valores obtidos para a tensão e corrente do arco elétrico estão apresentados na Tabela 4-1. Destaca-se a ausência de valores de tensão, para a corrente de 10A, em virtude da não abertura do arco elétrico no ensaio em que o gás de proteção não foi aquecido. Com tais valores, plotou-se o gráfico da Figura 4.1, relacionando-se à tensão medida com a corrente e temperatura do gás.

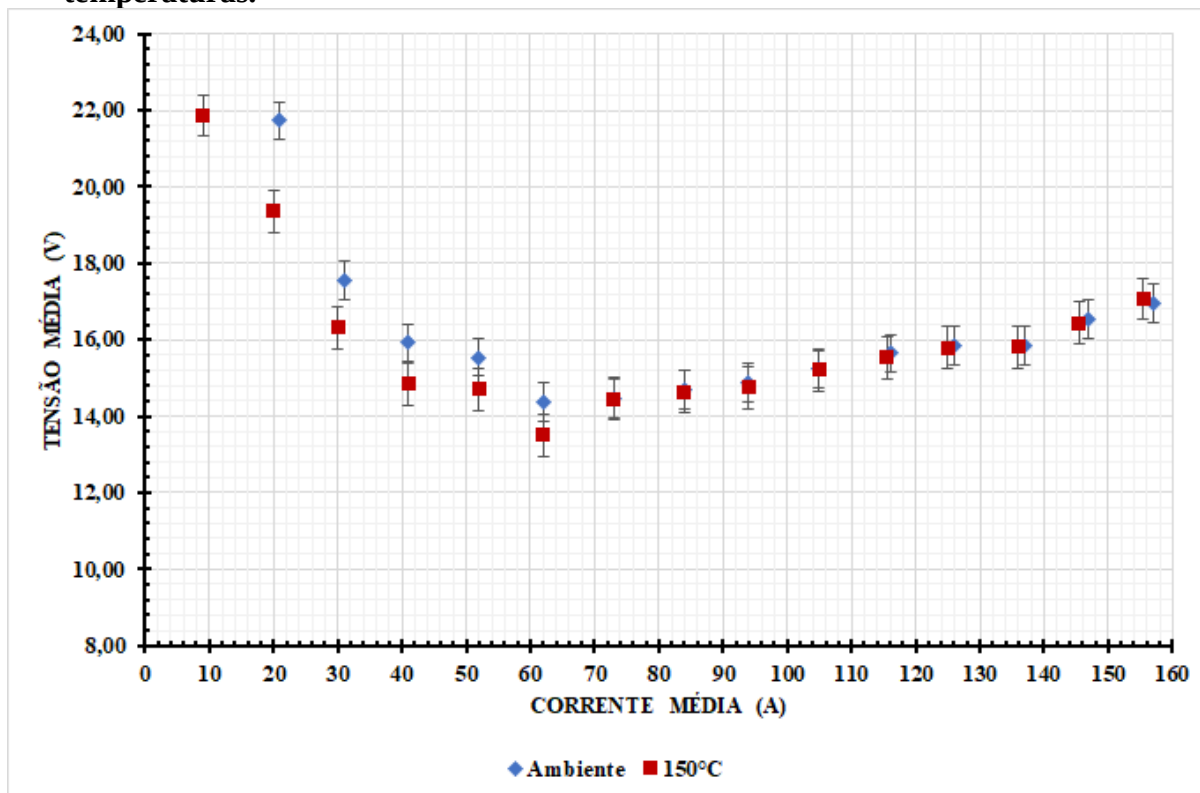
Observou-se que, no gráfico da Figura 4.1, os valores de tensões medidos apresentaram diminuição da diferença em seu valor com o gás de proteção sem e com aquecimento (ambiente e normal) para a faixa de corrente de 10 a 70A. Para as correntes maiores (80 a 150A), os valores de tensão foram similares, o que representa uma redução da influência do aquecimento do gás nos valores de tensão com o aumento da corrente de operação. As diferenças nos valores de tensão medidos, para as duas temperaturas do gás, em função das correntes baixas, estão apresentadas na Figura 4.2.

A curva apresentada na Figura 4.1 reproduziu o comportamento de curvas características presentes na literatura (MARQUES e MODENESI, 2015), sobressaindo-se, tal qual mostrada neste trabalho (Figura 4.1), a variável de parametrização, a temperatura do gás de proteção.

Tabela 4-1: Valores obtidos de tensão-corrente.

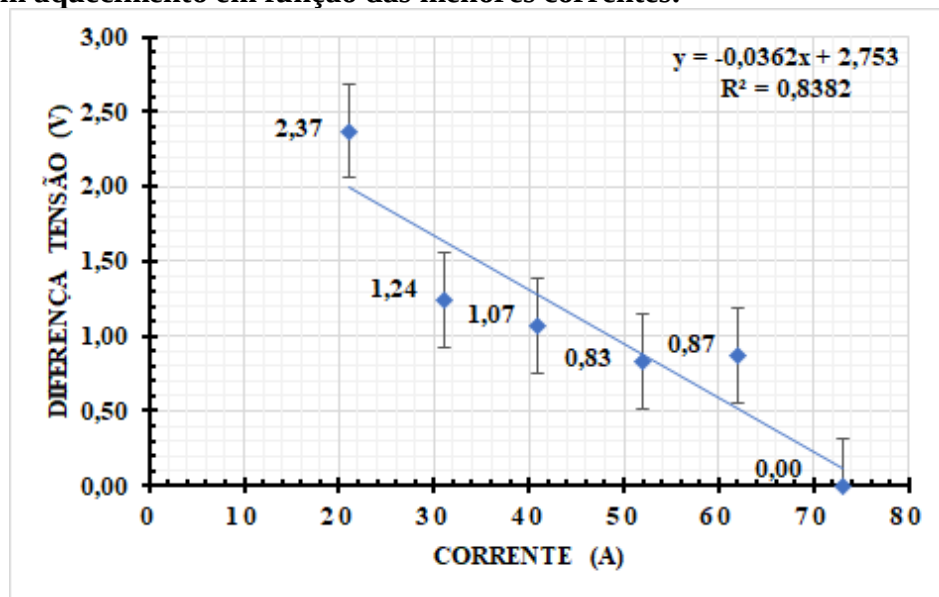
Temperatura do Gás							
Ambiente				150°C			
I (A)	Desvio I	U (V)	Desvio U	I (A)	Desvio I	U (V)	Desvio U
*	*	*	*	9	0,10	21,86	0,22
21	0,28	21,73	0,21	21	0,33	19,36	0,16
31	0,13	17,56	0,15	31	0,61	16,32	0,27
41	0,18	15,92	0,14	41	0,44	14,85	0,13
52	0,40	15,54	0,10	52	0,60	14,71	0,15
62	0,60	14,38	0,12	62	0,20	13,51	0,12
73	0,25	14,45	0,11	73	0,45	14,45	0,15
84	0,49	14,69	0,08	84	0,37	14,64	0,12
94	0,60	14,89	0,15	94	0,55	14,75	0,14
105	0,14	15,23	0,12	105	0,34	15,21	0,13
116	0,27	15,64	0,10	116	0,41	15,53	0,12
126	0,48	15,84	0,13	126	0,62	15,80	0,15
137	0,52	15,85	0,13	137	0,58	15,81	0,12
147	0,23	16,54	0,11	147	0,31	16,45	0,11
157	0,36	16,94	0,13	157	0,40	17,07	0,13

Figura 4.1 - Curva característica do arco elétrico GTAW para o gás em diferentes temperaturas.



Essas variações da tensão, observadas na Figura 4.1, para as correntes menores (10-70A), apresentam maior efeito na coluna do arco elétrico. Em modelo de análise dos efeitos da corrente e tensão do arco elétrico, MODENESI (2015) atribui que a corrente de soldagem tem uma relação direta com a quantidade de calor transferido para a peça, sendo, portanto uma variável fundamental, para determinar a quantidade de fusão no metal de base e a penetração da solda. Por outro lado, a tensão tem um menor efeito na penetração, pois suas variações causam maiores efeitos na coluna do arco, cujo calor gerado é transmitido, principalmente, na direção radial. Ressalta-se que o comprimento de arco está diretamente associado com a sua tensão e que o arco de soldagem tem um formato de tronco de cone, então, pode-se concluir que a tensão de soldagem afeta, sobretudo, a largura da solda.

Figura 4.2 – Diferença entre os valores de tensão medidos para o gás sem e com aquecimento em função das menores correntes.



A redução do efeito do aquecimento do gás de proteção nos valores de tensão foi calculada e determinada para a faixa de corrente utilizada.

Sendo Ar 39,948g/mol, R a constante dos gases [8,31447 J/molK], a vazão do gás de 6l/min [0,23mol/min=0,004mol/s], a variação de temperatura do gás foi de 25°C para 150°C [$\Delta T = T_{150} - T_{25} = 2,6\text{kJ/mol}$], o calor contido no aquecimento do gás foi de 2,58 KJ/mol, o valor de vazão 0,23mols/min e a potência de 9,8W; dessa forma, conseguiu-se o valor do número de mols do gás e encontrada a energia por cada mol, para o gás de proteção a 150°C, relacionando aos valores de corrente, tensão e potência do arco com a contribuição fornecida pelo aquecimento do gás de proteção. Valores estes apresentados na Tabela 4-2.

Os valores observados na Tabela 4-2 reforçam a ideia da redução da contribuição do aquecimento do gás nos valores de tensão à medida que se elevou a corrente de operação.

Tabela 4-2: Contribuição energética fornecida pelo aquecimento do gás de proteção.

I (A)	U (V)	P(W)	P _{gás} /P _{Arco} (%)
10	~ 22	220	4,1
30	~ 17	510	1,8
50	~ 15	750	1,2
70	~ 15	1050	0,9
90	~ 15	1350	0,7
110	~ 15	1650	0,6
130	~ 16	2080	0,5
150	~ 16	2400	0,4

Foi calculada, também, a condutividade elétrica na coluna, considerando somente a temperatura fornecida pelo aquecimento do gás, sendo utilizada a Equação 4.1.

$$\sigma_e = K \frac{T^{5/4}}{p^{1/2}} \cdot \exp\left(-\frac{eV_I}{2kT}\right) \quad \text{Equação 4.1}$$

$$\sigma_e = 1,16 \cdot 10^{-161} \Omega^{-1} \text{m}^{-1} [150^\circ \text{C}] \quad \sigma_e = 5,27 \cdot 10^{-259} \Omega^{-1} \text{m}^{-1} [25^\circ \text{C}]$$

Por meio do cálculo da condutividade elétrica, observou-se um ganho de, aproximadamente, $2,2 \cdot 10^{99}\%$ no seu valor somente realizando o aquecimento do gás.

Para a região de baixas correntes ($I < 70$ A), a tensão diminui com o aumento de corrente. Isso pode ser explicado pelo fato de que o aumento da corrente elétrica incorre em maior aquecimento do cátodo (facilitando a emissão de elétrons) e maior grau de ionização e aquecimento do meio em que o arco ocorre, resultando em maior facilidade para a passagem de corrente e, em consequência, uma diminuição da tensão elétrica do arco (MARQUES et al, 2011). Como observado na Tabela 4-2, o maior efeito do aquecimento do gás de proteção, nas correntes mais baixas, influencia nas condições discutidas (emissão de elétrons, grau de ionização e condutividade elétrica), resultando na diminuição dos valores tensão na região entre 10 e 70A, até valores similares para as correntes elevadas (80 a 150A) em que a contribuição do aquecimento do gás foi menor.

4.1.2. Imagens e Luminosidade do Arco Elétrico

As imagens do arco elétrico foram adquiridas juntamente com a aquisição dos resultados apresentados no item 4.1.1. Cada imagem foi relacionada à corrente nominal de operação utilizada e à temperatura de aquecimento do gás. Com essas imagens, foram realizadas as medidas da área do arco e avaliadas as principais diferenças.

As Figuras 4.3 e 4.4 representam as imagens do arco, para as correntes maiores e menores, respectivamente, em função da temperatura do gás de proteção.

Analisando as imagens do arco elétrico, foi possível observar aumento da área para todas as correntes determinadas ao se aquecer o gás de proteção. As maiores diferenças foram encontradas, para as menores correntes (10 a 30A), destacando-se a quase extinção do arco elétrico e a formação de anodos pontuais no caso em que o gás não foi aquecido.

Figura 4.3 - Imagens do arco elétrico em relação às maiores correntes e à temperatura de aquecimento do gás. Ambiente (a) e 150°C (b).

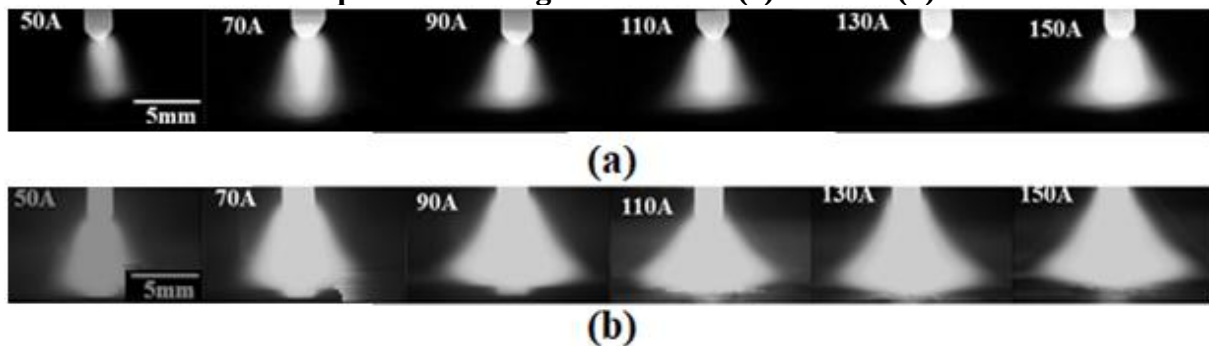
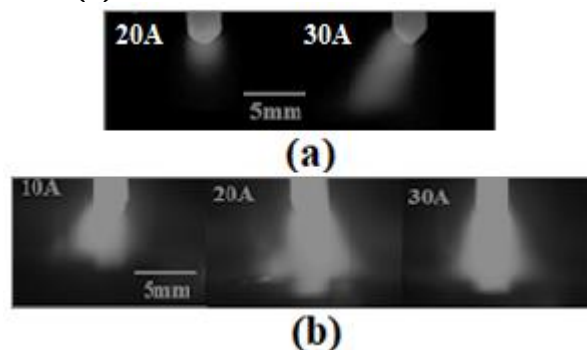


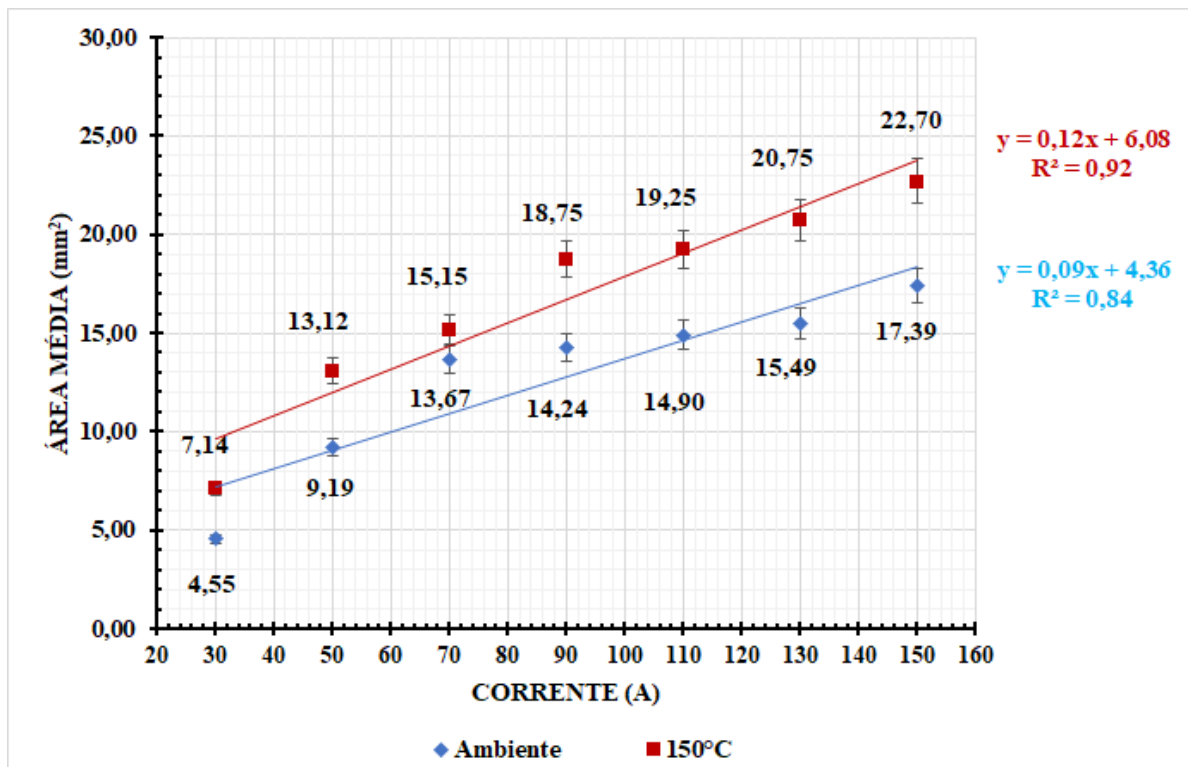
Figura 4.4 - Imagens do arco elétrico para as correntes mais baixas. Temperatura do gás de proteção (a) Ambiente e (b) 150°C.



Os valores das áreas do arco elétrico utilizados, para as correntes, são lançados no gráfico da Figura 4.5, destacando-se os valores sempre superiores quando o gás de proteção foi aquecido.

Na Figura 4.5 observou-se redução da diferença dos valores medidos da área do arco, para o gás de proteção sem e com aquecimento, ao se diminuir a corrente de operação.

Figura 4.5 - Área do arco elétrico medida pelo software Image J em função da corrente e temperatura de aquecimento do gás.



Conforme imagens do arco exibidas nas Figuras 4.3 e 4.4, observou-se maior aquecimento do eletrodo, ao se utilizar o gás aquecido, esse efeito tem influência na queda catódica e emissão de elétrons. Foi utilizada a Equação 2.1, para a determinação do valor de densidade de corrente, quando o gás de proteção foi aquecido, usando o valor de temperatura do eletrodo de 150°C.

$$J = 7 \cdot 10^5 (423)^2 \exp \left(- \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 423} \right)$$

O valor de densidade de corrente somente relacionado ao aquecimento do gás de proteção foi de $J_w = 1,60 \cdot 10^{-57} \text{ A/m}^2$ [25°C] e $J_w = 3,04 \cdot 10^{-37} \text{ A/m}^2$ [150°C], representando uma melhora de 1,9•10²²% apenas em relação ao efeito gerado pelo aquecimento do gás.

A expansão do arco elétrico, observado nas Figuras 4.3 e 4.4, está relacionada aos efeitos gerados pelo aquecimento do gás de proteção na coluna do arco, como a variação no grau de ionização, condutividade elétrica e densidade de corrente.

O aquecimento do gás de proteção melhorou a emissão de elétrons, porém reduziu a vida útil do eletrodo, acelerando a perda de sua afiação. Essa deterioração dos eletrodos está relacionada ao seu maior aquecimento pela passagem do gás de proteção a 150°C. Na Figura 4.6, estão apresentados eletrodos utilizados neste trabalho, para as correntes entre 30-150A e tempo de ensaio de 15 segundos.



Nota-se, na Figura 4.6, que, para as correntes mais baixas, os eletrodos apresentaram um consumo menor, como, por exemplo, para a corrente de 30 e 60A. Ao se elevar a corrente, o consumo foi aumentado, chegando a perder a afiação totalmente como no caso da corrente de 150A. Foi constatado que, sem o aquecimento do gás de proteção, os eletrodos apresentaram baixo consumo e danificação em sua afiação.

Para o gás sem aquecimento, o comportamento observado na Figura 4.6 ocorreu em pequena escala, ou seja, os eletrodos apresentaram desgaste muito pequeno, visto que foi observada manutenção da afiação original, após a realização dos ensaios, para todas as correntes utilizadas.

A mudança no perfil do arco (aumento de sua área) apresentou influência nos resultados que foram obtidos para a sua luminosidade (expansão do arco implicou uma maior área de emissão de luz), rendimento térmico (maiores perdas térmicas ocorridas na coluna do arco) e nas soldagens (alterações na morfologia das soldas).

Foi observado que o aquecimento do gás, mesmo sendo uma temperatura muito abaixo da apresentada pelo arco elétrico, influenciou no grau de ionização, condutividade elétrica e densidade de corrente, quando comparado aos valores obtidos para o gás em temperatura ambiente, conforme calculado.

Juntamente com as análises do perfil do arco elétrico, foram realizadas as medidas da luminosidade, sendo apresentados os valores calculados na Tabela 4-3.

Os valores de luminosidade, para a corrente abaixo de 30A para o gás sem aquecimento, não foram medidos em razão da instabilidade e não abertura do arco elétrico.

O gráfico de luminosidade do arco elétrico foi plotado, em função da corrente, para as duas temperaturas do gás de proteção (Figura 4.7).

Tabela 4-3: Dados adquiridos para a luminosidade do arco elétrico.

Temperatura do Gás					
Ambiente			150°C		
I nominal (A)	Luminosidade Média (Lux)	Desv. Padrão	I nominal (A)	Luminosidade Média (Lux)	Desv. Padrão
10	*	*	10	14,33	1,31
20	*	*	20	21,02	1,72
30	17,56	1,13	30	38,47	2,01
40	33,67	1,89	40	55,73	2,12
50	66,52	2,76	50	79,54	3,25
60	74,31	2,35	60	94,67	3,21
70	88,11	2,88	70	102,12	3,74
80	122,34	2,91	80	147,51	3,88
90	158,12	3,01	90	168,91	3,46
100	200,23	3,34	100	220,65	5,41
110	217,21	4,11	110	239,28	5,12
120	233,43	4,32	120	246,05	5,44

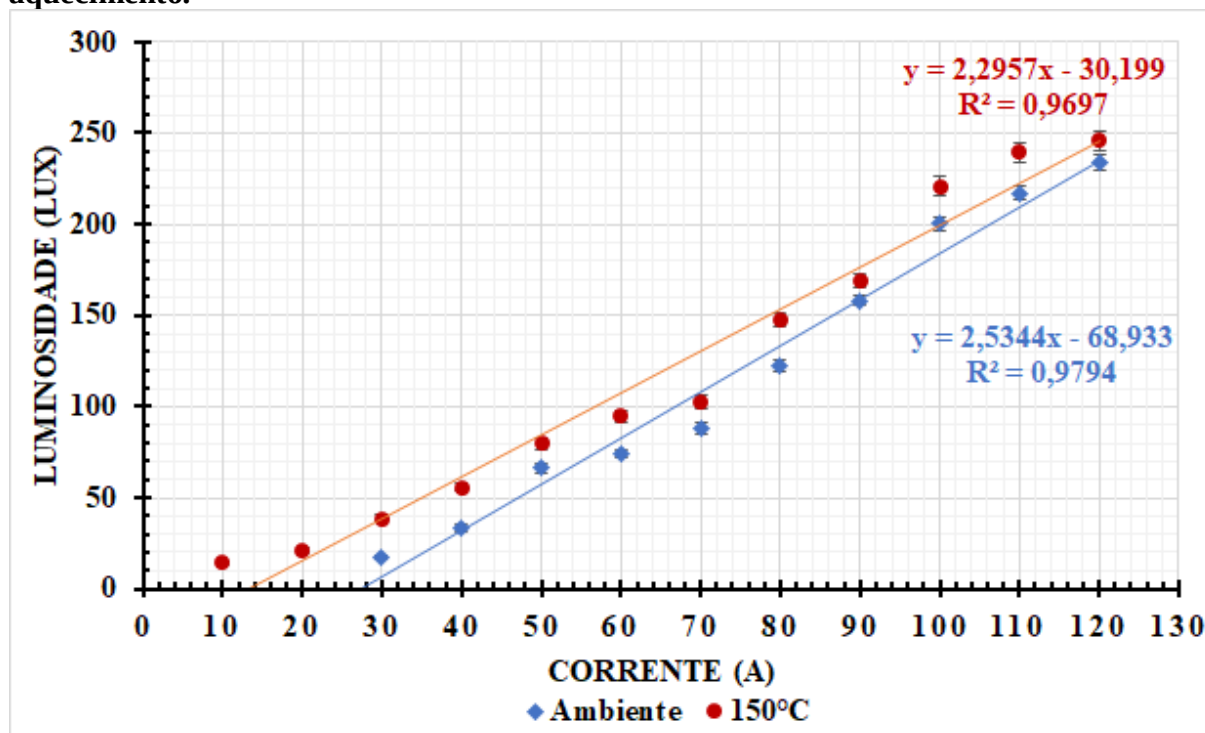
No gráfico apresentado na Figura 4.7 foi observado aumento da emissão luminosa, gerado pelo arco elétrico, para todas as correntes ao se aquecer o gás. A inclinação da reta mostrou que a diferença entre os valores de luminosidade, medidos nas duas temperaturas do gás (ambiente e 150°C), diminuiu ao se elevar a corrente determinada para a realização dos ensaios.

Considerando somente a temperatura de aquecimento do gás (150°C), na emissividade de radiação pela superfície do arco, definida pela Lei de Stefan-Boltzmann (Equação 4.2), em que σ é a constante de Stefan-Boltzmann [$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$], foi observada uma emissão luminosa de aproximadamente $\varepsilon = 447,15 \text{ Wm}^{-2}$ [25°C] e $\varepsilon = 1815,28 \text{ Wm}^{-2}$ [150°C], o que representou um aumento de, aproximadamente, 25% na emissão de radiação do arco elétrico.

$$\varepsilon = \sigma \cdot T^4$$

Equação 4.2

Figura 4.7 - Luminosidade do arco elétrico em função da corrente para o gás sem e com aquecimento.



4.1.3. Rendimento Térmico do Processo

Iniciaram-se as análises com a avaliação da aquisição da temperatura e vazão no calorímetro, na qual foi observada a evolução dos sinais. No gráfico de temperatura (Figura 4.8), foram plotadas três curvas; uma associada com a medição de temperatura da água na entrada do calorímetro, outra com a temperatura da água na saída do calorímetro e a última curva gerada pela relação entre a subtração das temperaturas de saída e de entrada ($T_s - T_e$).

A evolução do sinal de vazão está representada na Figura 4.9. Observam-se pequenas variações, durante a realização dos ensaios, porém pela média entre todos os ensaios executados foi possível observar que a vazão ficou na faixa de, aproximadamente, 9l/min com desvio-padrão de 0,2l/min.

As variações nos sinais da vazão de água podem ser relacionadas a interferências elétricas ou a outros fatores externos à medição que não foi possível identificar.

Figura 4.8 - Evolução dos sinais de temperatura da água durante realização dos ensaios de calorimetria.

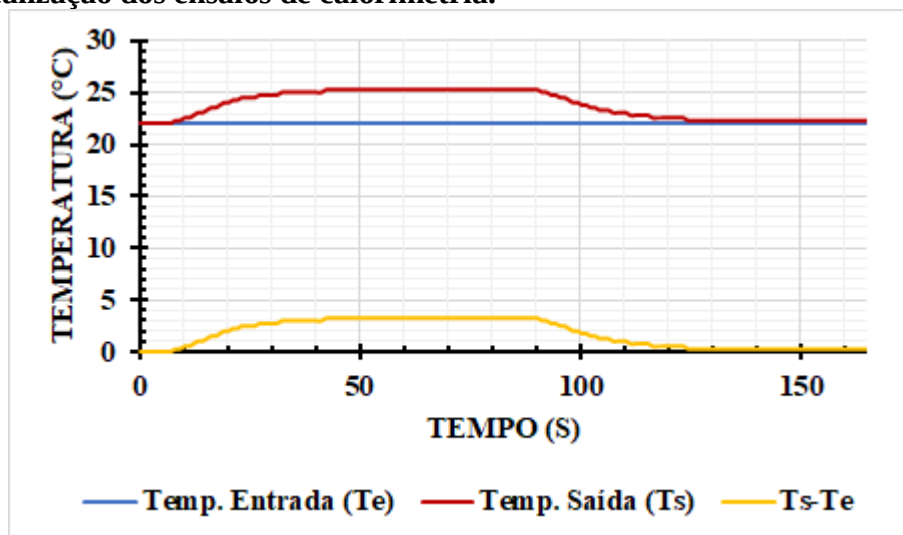
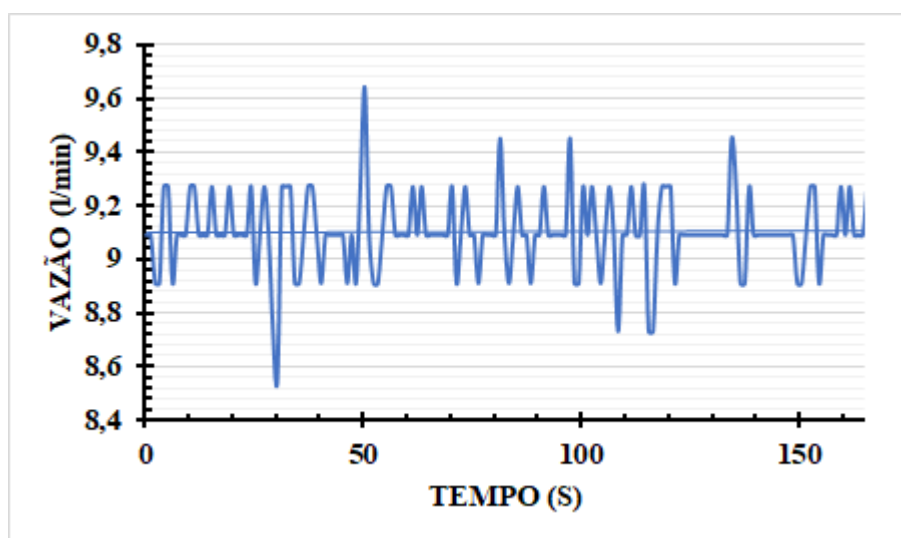


Figura 4.9 - Sinais de vazão durante a realização dos ensaios.

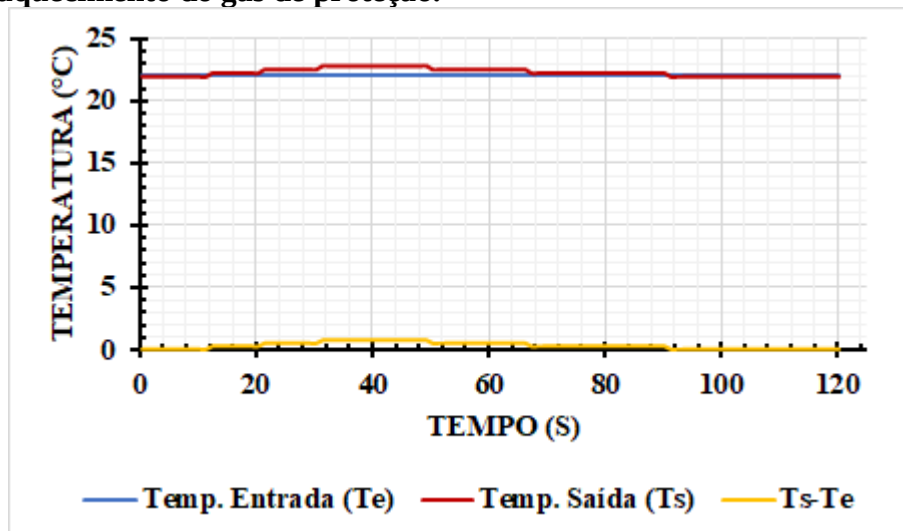


Foi analisada a variação da temperatura no calorímetro sem a abertura do arco com o objetivo de verificar o efeito gerado somente pelo aquecimento do gás. A Figura 4.10 apresenta as curvas de temperatura medidas para esta situação.

Pelos dados medidos na Figura 4.10, foi possível observar a influência do aquecimento do gás nos valores obtidos pelos ensaios de calorimetria. Durante a realização das medidas de temperatura, foram alcançados valores máximos na temperatura de saída do calorímetro de 22,25°C. Com esses dados, foi determinada a quantidade de calor fornecida somente pelo gás de proteção aquecido, sendo de 18,9KJ. Considerando o aquecimento da água no calorímetro, quando o arco elétrico foi aberto, T_s máximo foi de 25,50°C, o que produziu uma quantidade de calor de 264,6KJ. Dessa forma, o aquecimento do gás influenciou em 7% no calor transferido

para a água do calorímetro; esse valor foi descontado para os dados medidos neste trabalho (E_s , Q_{imp} , η).

Figura 4.10 - Evolução dos sinais de temperatura da água somente com o aquecimento do gás de proteção.



Os valores encontrados nos ensaios de calorimetria estão apresentados na Tabela 4-4 (gás sem aquecimento) e Tabela 4-5 (gás a 150°C). Os valores obtidos, para o rendimento térmico do processo, reduziram, ao realizar o aquecimento do gás, para as duas correntes utilizadas. A diferença medida, para as duas temperaturas do gás, foi de, aproximadamente, 5% para a corrente de 100A e 10% para 120A. Sugere-se, portanto uma maior influência do aquecimento do gás de proteção no rendimento térmico, para maiores correntes, podendo estar relacionado esse resultado à maior expansão do arco elétrico para valores de corrente maiores (análises do perfil na seção 4.1.2).

Foram destacados nas Tabelas 4-4 e 4-5 os valores de potência instantânea, energia de soldagem e calor imposto, sendo tirada uma média dos valores obtidos para as duas correntes determinadas (100 e 120A).

Observou-se, também, nos resultados apresentados, que, para um mesmo comprimento de arco, aconteceu variação da tensão com o aumento da corrente. Esse fato ocorre pela alteração do ponto de trabalho das curvas características estáticas do arco (CEA) e da fonte (CEF).

Tabela 4-4: Resultados dos experimentos de calorimetria para processo GTAW sem aquecimento do gás.

	U_m [V]	I_m [A]	P_{inst} [W]	t_s [s]	L_s [mm]	E_s [J/mm]	Q_{imp} [J/mm]	η	Corrente Nominal (A)
	14,69	105,77	2529,24	86,62	151,59	1445,28	1249,73	86,48	100
	14,67	105,78	2435,92	93,51	163,64	1391,95	1253,18	90,03	
	14,62	105,83	2597,94	87,62	153,34	1484,54	1339,50	90,23	
	14,72	105,87	2460,65	92,78	162,37	1406,09	1262,53	89,79	
	14,73	106,00	2490,00	90,72	158,76	1422,86	1261,93	88,69	
	15,88	124,33	2555,56	90,89	159,06	1460,32	1290,48	88,37	120
	15,64	124,38	2646,14	87,90	153,83	1512,08	1258,05	83,20	
	15,76	124,74	2585,69	89,00	155,75	1477,54	1203,45	81,45	
	15,90	124,46	2552,55	92,14	161,25	1458,60	1021,45	82,37	
	15,98	124,50	2561,64	90,63	158,60	1463,79	1182,31	80,77	
	U_m [V]	I_m [A]	P_{inst} [W]	t_s [mm]	L_s [mm]	E_s [J/mm]	Q_{imp} [J/mm]	η_m	Corrente Nominal (A)
Média	14,69	105,85	2502,75	90,25	157,82	1430,14	1273,37	89,04	100
Desv. Padrão	0,03	0,07	48,67	2,50	4,38	27,81	26,45	1,17	
Média	15,83	124,48	2580,32	90,11	157,70	1474,47	1191,15	83,23	120
Desv. Padrão	0,11	0,11	28,48	1,33	2,33	16,28	71,41	2,06	

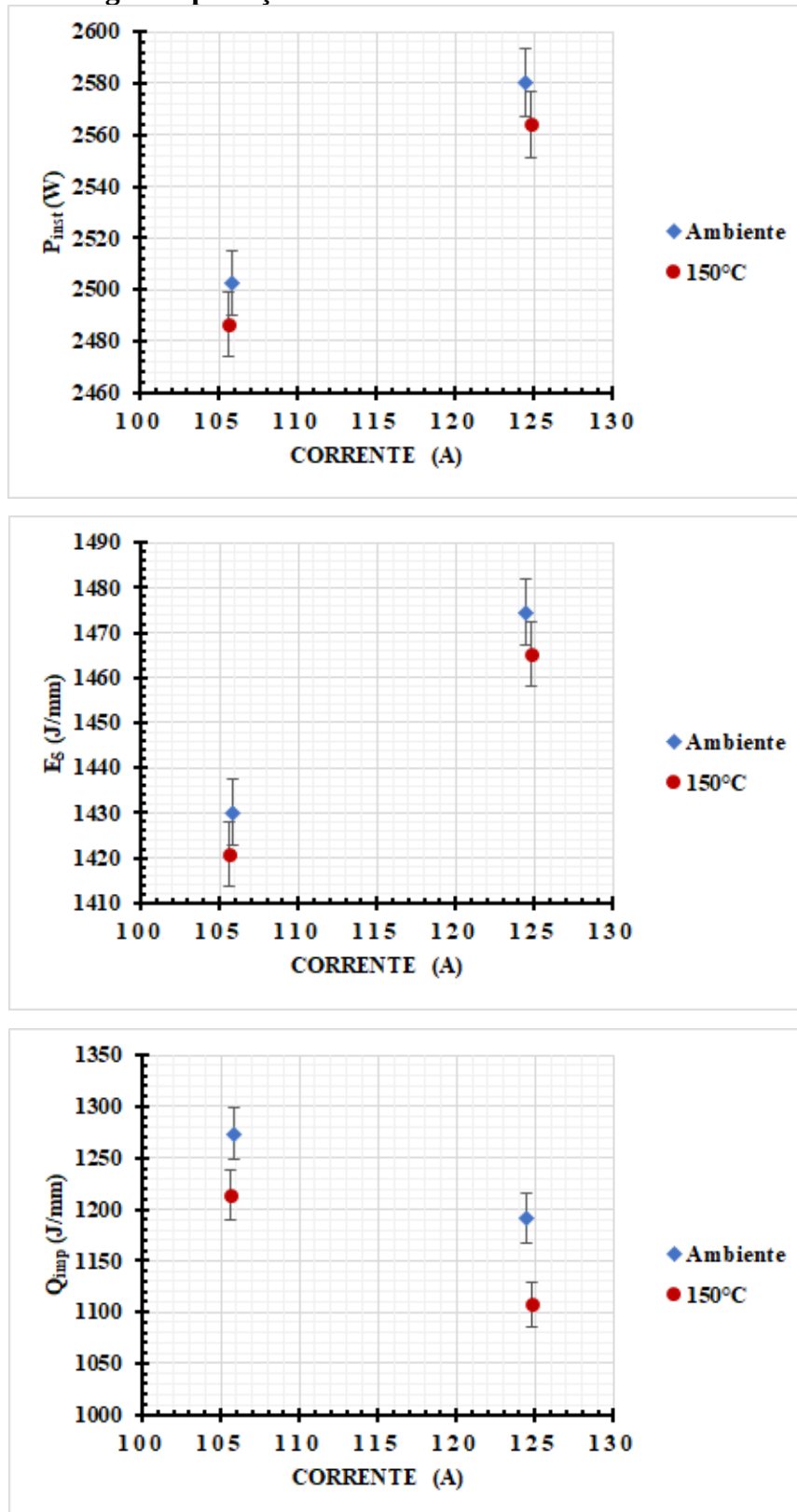
Tabela 4-5: Resultados dos experimentos de calorimetria para processo GTAW com aquecimento do gás.

	U [V]	I [A]	P_{inst} [W]	t_s [s]	L_s [mm]	E_s [J/mm]	Q_{imp} [J/mm]	η	Corrente Nominal (A)
	14,92	105,59	2545,40	84,82	148,44	1454,52	1232,12	84,71	100
	14,73	105,52	2426,30	88,55	154,96	1386,46	1186,25	85,56	
	14,58	105,57	2430,13	87,56	153,23	1388,65	1188,82	85,61	
	14,69	105,69	2444,31	87,40	152,95	1396,75	1189,89	85,20	
	14,58	105,76	2585,30	82,78	144,87	1477,31	1269,46	85,93	
	15,73	124,54	2586,06	84,12	147,21	1477,75	1073,88	72,67	120
	15,39	124,76	2636,82	83,97	146,95	1506,75	1140,91	75,72	
	15,36	124,88	2618,98	84,65	148,14	1496,56	1136,19	75,92	
	15,31	124,93	2528,74	87,92	153,86	1445,00	1103,98	76,40	
	15,92	124,96	2450,39	89,24	156,17	1400,22	1083,07	77,35	
	U_m [V]	I_m [A]	P_{inst} [W]	t_s [s]	L_s [mm]	E_{sm} [J/mm]	Q_{imp} [J/mm]	η_m	Corrente Nominal (A)
Média	14,70	105,63	2486,29	86,22	150,68	1420,74	1213,31	85,40	100
Desv. Padrão	0,10	0,08	63,25	1,94	3,39	36,14	29,99	0,36	
Média	15,54	124,81	2564,20	85,98	150,47	1465,26	1107,61	75,61	120
Desv. Padrão	0,23	0,13	59,71	2,08	3,64	34,12	24,76	1,18	

Os valores médios obtidos nos ensaios de calorimetria, para a potência instantânea (P_{inst}), energia de soldagem (E_s) e calor imposto (Q_{imp}), são apresentados na Figura 4.11. Analisando os gráficos dessa Figura, observaram-se valores similares para P_{inst} e E_s . O calor imposto (Q_{imp})

apresentou uma diferença maior, em relação aos valores obtidos para as duas temperaturas do gás, para ambas as correntes determinadas.

Figura 4.11 – Valores médios de P_{inst} , E_s e Q_{imp} em função da corrente e temperatura do gás de proteção.



Essa diferença nos valores do calor imposto podem estar ocorrendo por maiores perdas térmicas na coluna do arco ao aquecer o gás de proteção. Isso afetou o valor do rendimento térmico do processo em ambas as correntes determinadas. Segundo FILHO (2008), quanto mais alto o calor imposto maior será a quantidade de energia calorífica transferida à peça, maior a poça de fusão, mais larga a zona termicamente afetada entre outros efeitos.

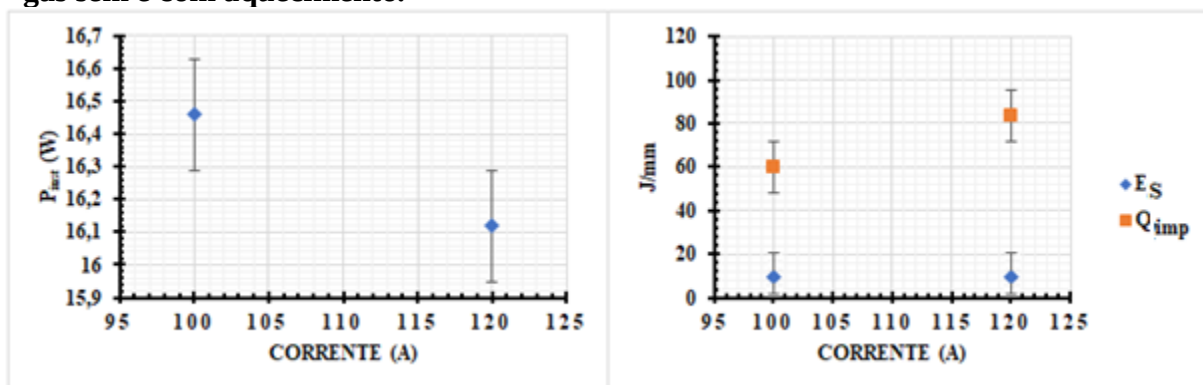
As variações podem ser atribuídas, ainda, aos efeitos proporcionados pelo aquecimento do gás de proteção, sendo observada a diminuição dos valores medidos de P_{inst} , E_s e Q_{imp} com o gás a 150°C. Estes valores são apresentados na Tabela 4-6.

Tabela 4-6: Diferença dos valores medidos nos experimentos de calorimetria para o gás de proteção sem e com aquecimento.

Corrente (A)	P_{inst} [W]	E_s [J/mm]	Q_{imp} [J/mm]
100	16,46	9,40	60,06
120	16,12	9,21	83,54

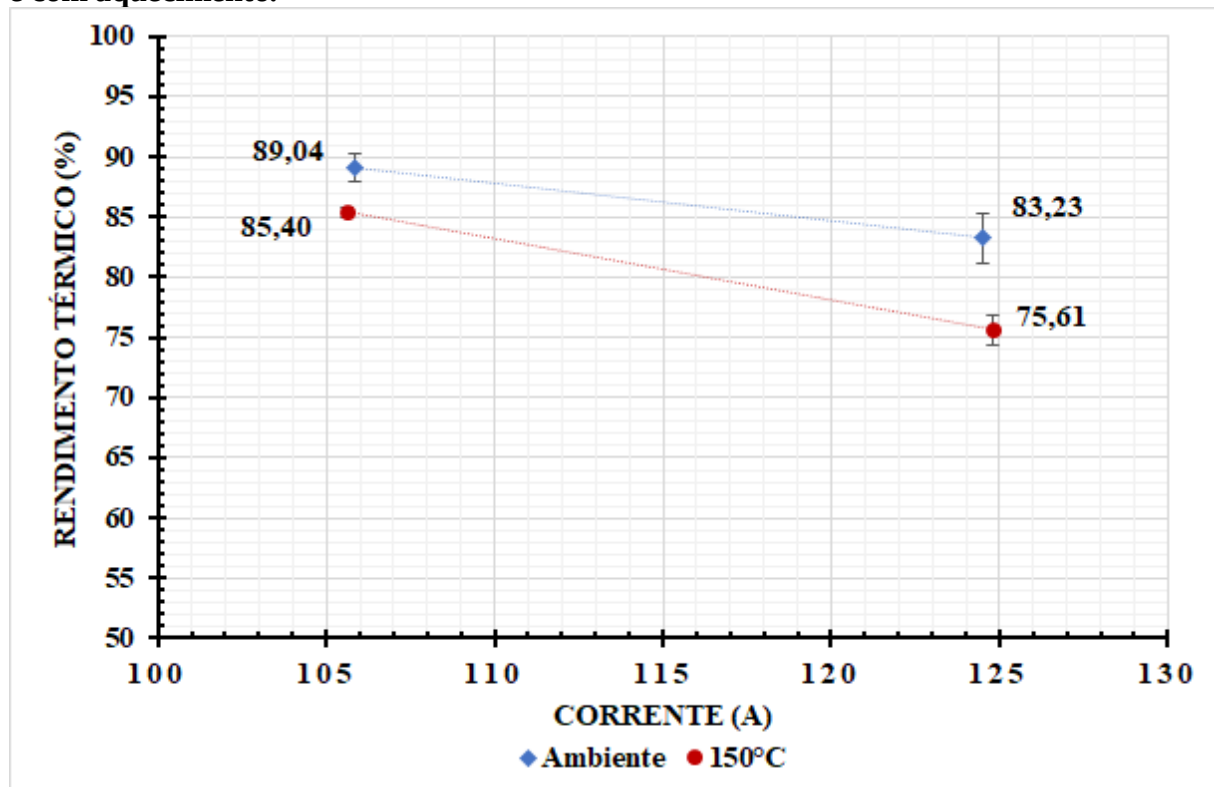
Foi observado que, para a E_s e P_{inst} , a variação de uma corrente para a outra foi muito pequena, diferente do que ocorreu no Q_{imp} que apresentou uma variação entre as correntes utilizadas de, aproximadamente, 23J/mm.

Figura 4.12 – Diferença dos valores medidos nos experimentos de calorimetria para o gás sem e com aquecimento.



Foi realizada a comparação dos valores medidos de rendimento térmico, para o gás sem e com aquecimento (Figura 4.13), que está relacionada às correntes.

Figura 4.13: Valores medidos do rendimento térmico do processo GTAW para o gás sem e com aquecimento.



Os valores medidos para o rendimento térmico do processo GTAW foi de 89 e 83% para o gás em temperatura ambiente e 85 e 75% com o gás a 150°C, para as condições de soldagem utilizadas neste trabalho. Estes valores estão próximos aos trabalhos já realizados por outros autores (Figura 2.9) e, na faixa de rendimento térmico determinada por STEMBACKA (2013) (Tabela 2-3), para testes em cobre (como utilizado neste trabalho).

A diminuição do rendimento térmico, ao se aquecer o gás, para uma mesma corrente de operação (Figura 4.13), pode ser relacionada às análises do perfil do arco (que sofre expansão ao aquecer o gás) e luminosidade (perdas térmicas durante o processo de soldagem).

O comportamento do rendimento térmico apresentou tendência a diminuir com o aumento da corrente, apresentando uma queda de 89 para 83% (gás sem aquecimento) e 85 para 75% (gás aquecido) para 100 e 120A, respectivamente. Este fato transcorre, provavelmente, pelas perdas de calor por convecção e radiação, que acontece durante a soldagem, que tem uma influência maior que o aumento da corrente. NILES (1975), em um estudo para GTAW, variando diferentes parâmetros, como a corrente e os gases de proteção, reporta que o rendimento térmico cai de 60 para 35% para correntes de 125 e 225A, respectivamente. LIMA e SILVA (2003)

demonstraram a mesma tendência, obtendo rendimentos da ordem de 86% para 40A, 75% para 70A e 65% para 100A.

Apesar de o aumento da tensão elevar o calor imposto, o rendimento térmico mostrou uma diminuição, como pode ser observado. Este efeito está acontecendo em razão das perdas de calor na coluna do arco serem maiores do que a energia produzida pelo aumento da tensão, a qual está diretamente influenciada pelas dimensões da coluna de plasma, em que uma expansão do arco (como observado nas análises do perfil do arco, seção 4.1.1) levou a uma maior área de contato com o ambiente. Estes efeitos foram observados por ARÉVALO (2011), em seu trabalho e esse mesmo comportamento foi reportado por APPS (1955) e HIRAOKA (1998).

Além disso, podem também sofrer influências das alterações suportadas nas soldas pelo aquecimento do gás de proteção. ZIJP (1990) mostrou que o rendimento térmico recebe influência direta em seu valor pelas alterações na penetração e largura das soldas.

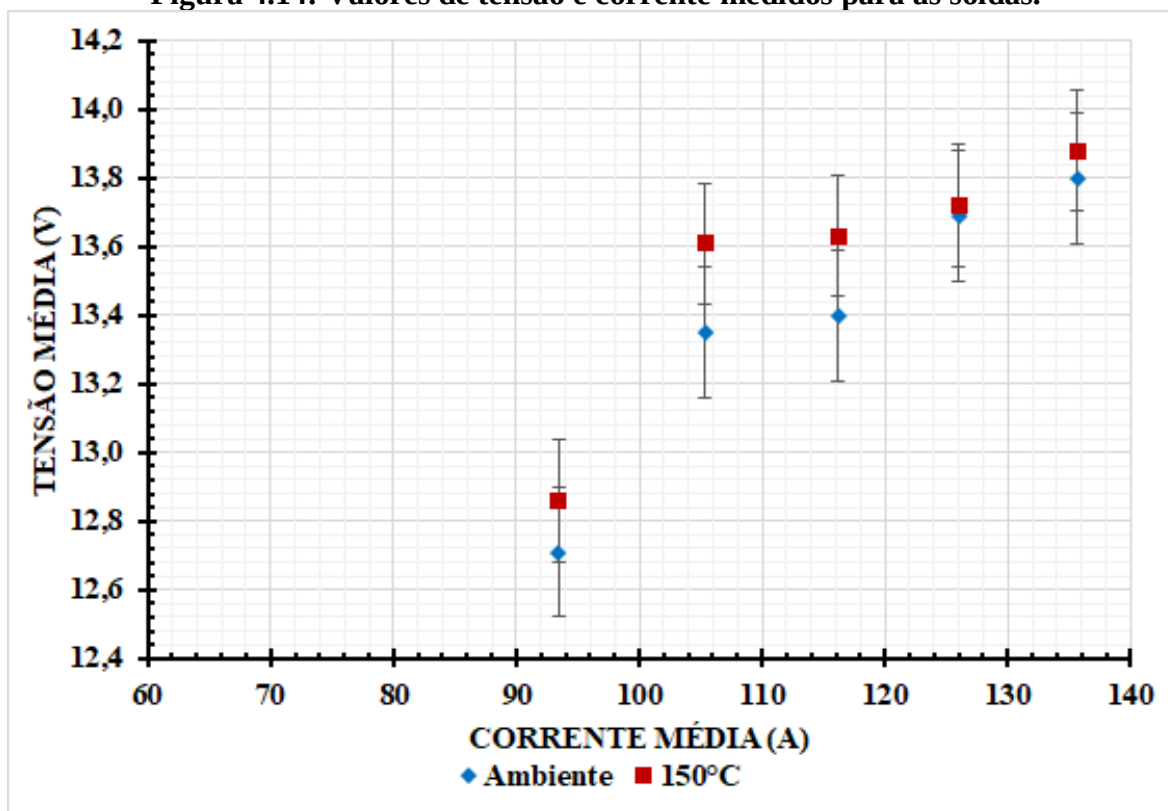
4.2. Análise das Soldas

Os valores de tensão, para as correntes determinadas nas análises das soldas, foram medidos (Figura 4.14). Observou-se que foram similares às diferentes temperaturas do gás (Ambiente e 150°C) e tal comportamento também foi constatado, anteriormente, quando analisados os efeitos do aquecimento do gás de proteção no arco elétrico para faixas de corrente mais elevadas (Seção 4.1.1). Porém, diferente do procedimento adotado no estudo do arco, em que o anodo foi refrigerado (sem formação de poça de fusão) nas soldas, ocorreu maior geração de vapores metálicos. Apesar da quantidade de vapores metálicos ser pequena e próxima à poça de fusão, diversos estudiosos (CRESSAULT et al, 2008; CHEMINAT e ANDERSON, 1985; VACQUIE, 1996; RAZAFINIMANANA et al, 1995; MURPHY et al, 2009; SCHNICK et al, 2010) demonstraram que eles alteram as propriedades físicas do arco. Dentre as alterações, a que mais se destaca é o aumento da condução elétrica e o da radiação (emissividade eletromagnética).

O aumento da radiação implica mais energia enviada para fora do arco elétrico que provoca a diminuição da temperatura das regiões do arco afetadas pelos vapores metálicos. GONZALEZ et al (1997) apresentaram, em seu trabalho, que vapores de ferro no arco com uma concentração de, aproximadamente, 0,1% pode causar uma diminuição de 1000K na temperatura do arco e RAZAFINIMANANA et al (1995) obtiveram queda de 2000K na Temperatura do arco quando os vapores são de cobre e à concentração de 1%.

ROSSI (2010) demonstrou, em seu trabalho, que os vapores metálicos, gerados em blocos de cobre refrigerados (como o utilizado neste trabalho, para as análises do arco elétrico, curvas tensão-corrente, Seção 4.1.1), alteram o comportamento do arco, como a geração de pontos de acoplamento do arco no anodo. Esse autor atribui esse mesmo comportamento, ao se realizar soldas em chapas de aço, diferenciando com o anodo de cobre, a maior geração de vapores metálicos produzidos pela fusão do aço, influenciando nos valores de tensão e emissividade térmica.

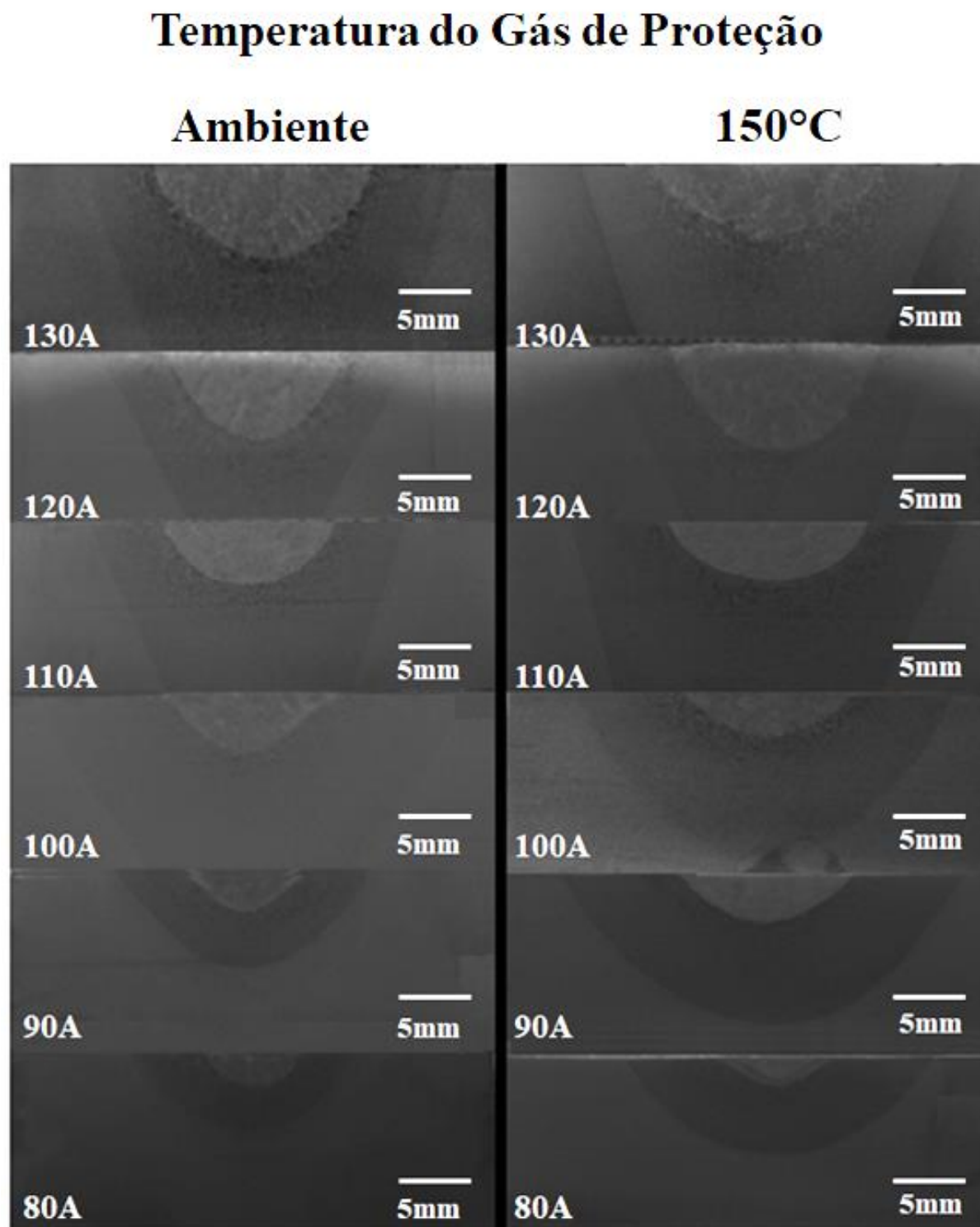
Figura 4.14: Valores de tensão e corrente medidos para as soldas.



Observou-se a macroestrutura das soldas, estando apresentados na Figura 4.14 essas macros em função das correntes nominais determinadas e temperaturas do gás de proteção.

Na Figura 4.15 foram observados a redução na penetração e o aumento da largura das soldas quando o gás foi aquecido.

Figura 4.15 - Macroestruturas das soldas para diferentes temperaturas do gás de proteção.



Os resultados apresentados na Figura 4.15 estão diretamente ligados ao observado na Seção 4.1.2, quando analisado o perfil do arco elétrico, ou seja, a ocorrência da expansão do arco ao se aquecer o gás.

Os valores de penetração, largura e área das soldas foram medidos das macros apresentadas na Figura 4.15 e estão mostrados nas Tabelas 4-7 e 4-8.

Tabela 4-7: Valores medidos da largura e penetração das soldas.

Corrente (A)	Temperatura do Gás							
	Ambiente				150°C			
	Penetração (mm)	Desv. Padrão	Largura (mm)	Desv. Padrão	Penetração (mm)	Desv. Padrão	Largura (mm)	Desv. Padrão
130	3,33	0,31	8,56	0,43	2,42	0,24	9,53	0,33
120	2,49	0,22	7,29	0,38	1,81	0,27	8,66	0,37
110	2,14	0,21	5,18	0,35	1,76	0,38	7,29	0,42
100	1,95	0,47	4,21	0,33	1,41	0,33	6,71	0,44
90	1,58	0,41	3,58	0,12	1,02	0,34	5,35	0,35
80	1,01	0,32	2,49	0,21	0,85	0,41	3,89	0,23

Tabela 4-8: Valores medidos da área das soldas.

Corrente (A)	Temperatura do Gás			
	Ambiente		150°C	
	Área (mm ²)	Desv. Padrão	Área (mm ²)	Desv. Padrão
130	19,52	0,32	18,35	0,41
120	15,22	0,51	14,56	0,42
110	12,85	0,46	11,73	0,46
100	9,85	0,44	8,92	0,35
90	4,81	0,35	4,27	0,38
80	3,78	0,34	3,61	0,33

Para melhor relacionar os efeitos gerados pelo aquecimento do gás, na morfologia das soldas, foram plotados os gráficos das Figuras 4.16, 4.17 e 4.18.

Pela análise dessas Figuras, observou-se que a diferença, para as duas temperaturas do gás de proteção, nos valores de penetração e largura, variou com o aumento da corrente e a área das soldas apresentou pequenas modificações.

Figura 4.16: Penetração das soldas para diferentes temperaturas do gás de proteção.

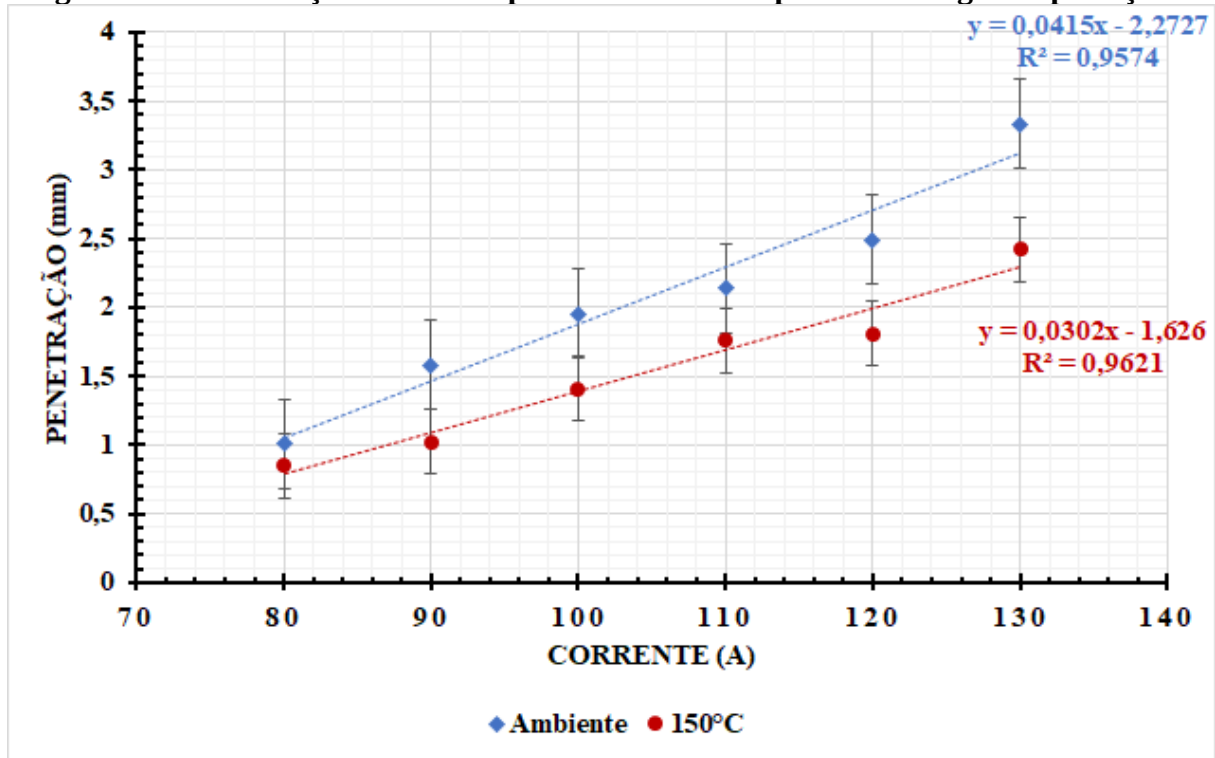


Figura 4.17: Largura das soldas para diferentes temperaturas do gás de proteção.

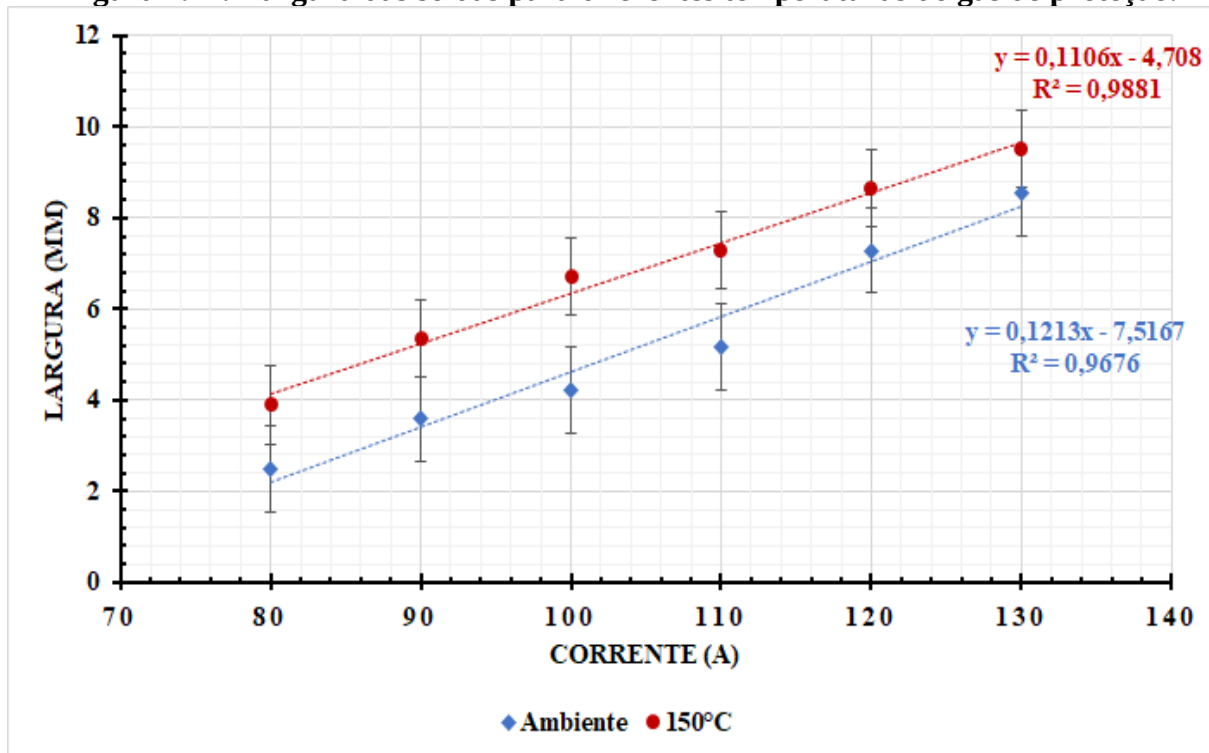
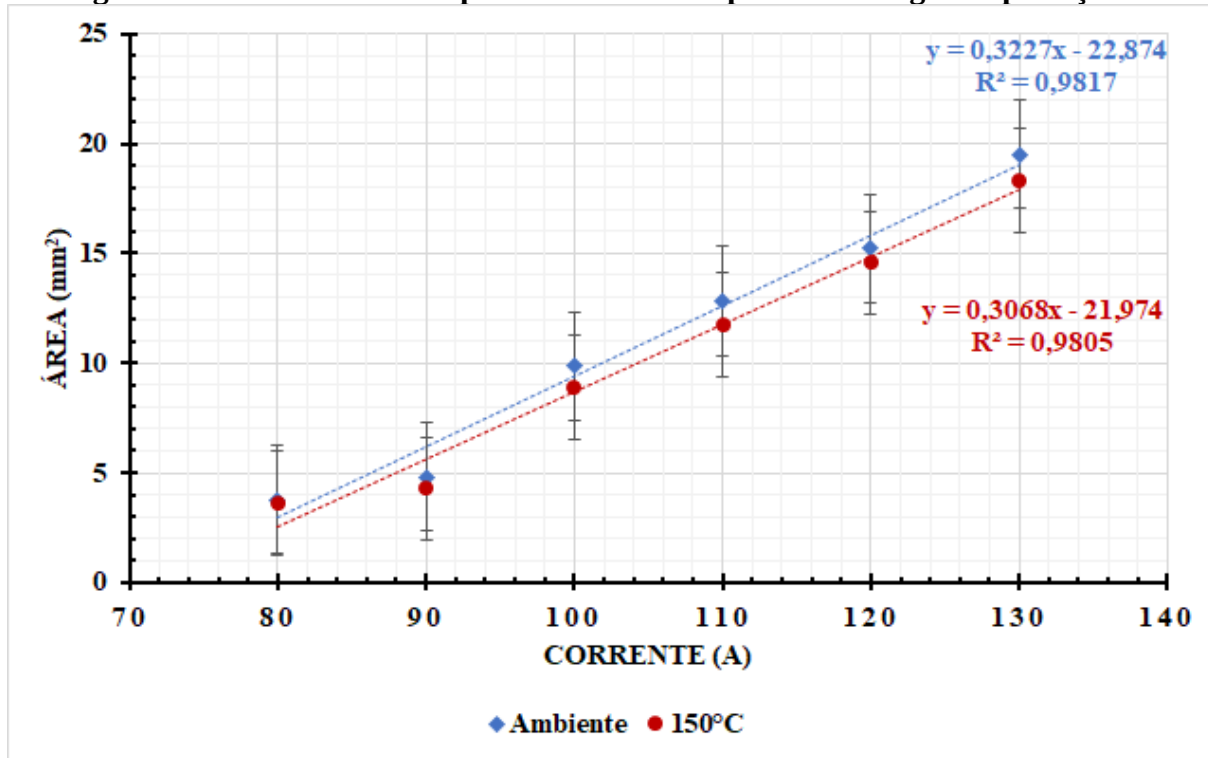


Figura 4.18: Área das soldas para diferentes temperaturas do gás de proteção.

Uma explicação, para os efeitos observados nas soldas com o gás aquecido, é a expansão do arco elétrico, fato que facilitou a passagem do arco para a poça nas regiões em que a sua temperatura foi menor, resultando em maior largura nas soldas. Isso alterou as dimensões da mancha anódica, que foram aumentadas, ou seja, o aquecimento atuou como um facilitador ao movimento elétrico do arco (aumentou a condutividade elétrica na coluna do arco, calculado na Seção 4.1.1 pela Equação 4.2). Essa expansão do arco elétrico fez com que a penetração diminuísse pela distribuição energética da coluna em maior área.

Outro teste qualitativo realizado nas soldas foi a redução da vazão do gás de 6l/min para 4l/min, mantendo-se todos os outros parâmetros constantes (Seção 3.6.1, Tabela 3-5). Neste ensaio, foi observado que o aquecimento do gás de proteção possibilitou a redução da vazão sem alterações na solda. Essa ocorrência pode ser comprovada pela Figura 4.19, em que estão apresentadas imagens da superfície de duas soldas realizadas com corrente de 100A, com o gás a 150°C e vazões de 6l/min e 4l/min. Um teste em que seria possível observar os efeitos do aquecimento do gás de proteção no seu fluxo é a Imagem *Schlieren*, atribuída como sugestão para trabalho futuro, já que a possibilidade da redução do consumo do gás de proteção pode ser um atrativo quanto à aplicabilidade deste trabalho.

Figura 4.19: Imagens das superfícies de soldas com diferentes vazões do gás de proteção aquecido a 150°C.



O comportamento apresentado na Figura 4.19 não foi possível sem a realização do aquecimento do gás de proteção, ou seja, em temperatura ambiente ocorreu falta de proteção, ao utilizar a vazão de 4l/min, não produzindo soldas com aspectos similares.

Apesar da diminuição da vazão do gás de proteção (4l/min) e seu aquecimento (150°C), o escoamento continuou laminar, como foi observado, ao se calcular o número de Reynolds (Re), para o arco de 100A como sendo de, aproximadamente, 350 ($w = 2,11\text{m/s}$; $\rho_p = 0,774\text{kg/m}^3$; $\mu_d = 2,97 \cdot 10^{-5}\text{kg/ms}$), sendo w a velocidade, ρ_p a densidade e μ_d a viscosidade dinâmica do plasma. MCKELLIGET e SZEKELY (1986) e WENDELSTORF et al. (1997) afirmam que a transição do regime laminar-turbulento acontece no arco de soldagem GTAW para valores de Re acima de 500. Isso pode ser um dos fatores para a falta de proteção, ao utilizar vazão do gás de proteção de 4l/min com o gás sem aquecimento, em virtude do escoamento mais turbulento ($Re \sim 524$).

5. CONCLUSÕES

Em função do objetivo proposto neste trabalho, ou seja, de avaliar a influência da temperatura do gás de proteção utilizado, no processo de soldagem GTAW, as seguintes conclusões foram alcançadas:

- O aquecimento do gás de proteção influenciou no grau de ionização, densidade de corrente e condutividade elétrica da coluna do arco. Essas alterações provocaram uma expansão do arco elétrico e maior emissão luminosa, proporcionando soldas com menor penetração e maior largura. Esses fatores podem ser benéficos em soldagens que necessitam de maior controle do aporte térmico como em soldas de chapas finas.
- Observou-se que o aquecimento do gás possibilitou o uso de correntes baixas (10-70A), mesmo com um comprimento de arco grande (4mm), sendo este efeito aplicável em soldas que requerem correntes baixas e estabilidade do arco elétrico como em soldagem Micro-TIG.
- Em testes iniciais, foi possível a redução na vazão do gás de proteção, ao se realizar seu aquecimento, o que sugere uma diminuição em seu consumo, representando menor custo do processo.
- Foi observada, porém queda no rendimento térmico do processo, o que representa uma redução na produtividade, além de maior consumo e deterioração do eletrodo, ao se utilizar correntes elevadas juntamente com o aquecimento do gás de proteção.

Dessa forma, o aquecimento do gás de proteção utilizado, no processo de soldagem GTAW, apresentou-se benéfico em soldas que necessitam de maior controle do aporte térmico e em faixas de corrente mais baixas (10-70A), além de proporcionar uma redução no consumo do gás de proteção.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- 1 – Realização de soldas com baixas correntes para avaliar a região da curva característica do arco em que foi observada variação nos valores de tensão.
- 2 – Mapeamento da temperatura do arco elétrico por espectroscopia ótica.
- 3 – Estudo do fluxo de gás de proteção pela metodologia de Imagem Schlieren.
- 4 – Análise da microestrutura das soldas para o gás em diferentes temperaturas.
- 5 – Aperfeiçoamento do sistema de aquecimento do gás de proteção e desenvolvimento de uma tocha de soldagem GTAW capaz de suportar e isolar as altas temperaturas de aquecimento do gás.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, N. S.; ANDRADE-NETO, A.V.; LEMAIRE, T.; CRUZ, J. A. **Investigação Teórica e Experimental do Efeito Termiônico**. Revista Brasileira de Ensino de Física, Brasil, v. 35, n. 1, p. 1308, fevereiro, 2013.

ARAUJO, D. B. **Metodologia para Uso de Simulação Física no Estudo da ZAC e na Obtenção de Diagramas CCT para Soldagem**. Dissertação apresentada a Universidade Federal de Uberlândia para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Uberlândia, 2008.

ARÉVALO, HERNÁN DARIO HERNÁNDEZ. **Desenvolvimento e Avaliação de Calorímetros Via Nitrogênio Líquido e Fluxo Contínuo (Água) para Processos de Soldagem**. Dissertação apresentada a Universidade Federal de Uberlândia para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Uberlândia, 2011.

BAG, S. e DE, A., **Probing Reliability of Transport Phenomena Based Heat Transfer and Fluid Flow Analysis in Autogeneous Fusion Welding Process**. Metall. & Material Transactions A, Vol 41A, Sep. 2010, pp. 2337-2347.

CANTIN, G. M. D. FRANCIS, E. J. A. **Arc Power and Efficiency in Gas Tungsten Arc Welding of Aluminum**. Science and Technology of Welding and Joining, vol. 12, n° 2, 200-210. 2005.

CHEMINAT, B; ANDANSON, P. **Conduction in an Electric Arc Column Contaminated by Copper Vapour**. Iopscience: Journal of Physics D: Applied Physics, v. 18, n. 11, p. 2183-2192, 1985. DOI: 10.1088/0022-3727/18/11/008.

CHRISTENSEN, N, DAVIES, L. & GJERMUNDSEN, K. **Distribution of Temperatures in Arc Welding**. British Welding Journal, February, 5-75. 1965.

COLINGS, N, WONG, K.Y. GUILLE, A.E. **Efficiency of Tungsten-inert-gas arcs in Very-high-speed Welding**. Proc. IEE 126(3), 276-280. 1979.

CRESSAULT, Y et al. **Influence of Metallic Vapours on the Properties of Air Thermal Plasma**. Iopscience: Plasma Sources Science and Technology, v. 17, n. 13, p. 1-9, 2008. DOI: 10.1088/0963-0353/17/3/035016.

CRUZ, Juliane Ribeiro. SCOTTI, Américo. **Materiais para Eletrodos que Emitem Termionicamente em Soldagem a Arco**. Soldagem Insp. vol.18 n°.4 São Paulo. 2013.

DUPONT, J. N.; MARDER, A. R. **Thermal Efficiency of Arc Welding Processes**. Department of Material Science and Engineering. 406s-416s. 1995.

DUTTA, P., JOSHI, Y. &FRANCHE, C., **Determination of Gas Tungsten Arc Welding Efficiencies**. Experimental Thermal and Fluid Science, Vol 1, Issue 1, July 1994, pp. 80-89.

FILHO, C. A. **Metalurgia da Soldagem**. [Apostila]. CEFET: Belém. 2008. 42 p.

- FORTES, M. A. ROSA, M. E. PEREIRA, H. **A Cortiça**. IST Press, Lisboa. 2004.
- GHEENT, H.W., ROBERTS, D.W., HERMANCE, C.E., KERR, H.W., STRONG, A.B. **Arc Efficiencies in TIG Welds**. In Conf. Proc., Arc physics and weld pool behavior. Cambridge: The Welding Institute. 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.
- GUILE, A. E. **Arc-electrode Phenomena**. PROC. IEE, IEE REVIEWS, Vol. 118, n°. 9R. 1971.
- HIRAOKA, K.; SAKUMA, N.; ZIJP, E. J. **Energy Balance in Argon-Helium Mixed Gas Tungsten (TIG) Arcs**. Study of Characteristics of Gas Tungsten Shielded by Mixed Gases (3rd report). Welding International, vol. 12, n° 5, pp. 372-379. 1998.
- INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P.; BERGMAN, Theodore L.; LAVINE, Adrienne S. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 7.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- KUSCH, M.; HAELSIG, A.; MAYER, P. **New Findings on the Efficiency of Gas Shielded Arc Welding**. Welding in the World, v. 56, p. 98-104. 2011.
- LANCASTER, J.F. **The Physics of Welding**, Pergamon Press & International Institute of Welding. 1986.
- LANCASTER, J.F. **The Physics of Welding**, Pergamon Press & International Institute of Welding. 1994.
- LIMA, E. F.; FOSCHINI, M.; MAGINI, M., **O efeito Termiônico: Uma Nova Proposta Experimental**. Revista Brasileira de Ensino de Física, Brasil, v. 23, n. 4, p.391-394, dezembro, 2001.
- LINNERT, G. E. **Welding Metallurgy: Carbon and Alloy Steels**. v.1 - Fundamentals, 4 Ed. Miami, Florida, USA. AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS), p. 940. 1994.
- LISBOA, Camila Pereira; OLIVEIRA, Enoque Pinto Júnior; ALVES, Valtair de Jesus; LERMEN, Richard Thomas. **Simulação Numérica do Arco Elétrico TIG: Efeito dos Parâmetros Sobre a Voltagem, Temperatura e Velocidade do Plasma**. 4^a Semana Internacional de Engenharia e Economia FAHOR. Horizontina - RS, 2014.
- LU, M. J; KOU, S. **Power Inputs in Gas Metal Arc Welding of Aluminum: Part 2**. Welding Journal. 60(11):452s-456s. 1989.
- MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; VALENTE, O. B. **Características do Arco de Soldagem TIG em Diferentes Atmosferas**. IN: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DE SOLDAGEM, 24, 1998, Fortaleza. Anais... Fortaleza: Associação Brasileira de Soldagem, 1998.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José. **Algumas Equações Úteis em Soldagem**. Soldagem Insp. São Paulo, Vol. 19, nº. 01, p.091-102. 2015.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo, José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem - Fundamentos e Tecnologia**. 3ª Ed, Belo Horizonte. 2011.

MCKELLIGET, J. and J. SZEKELY. **Heat Transfer and Fluid Flow in the Welding Arc**. Metallurgical Transactions A, v.17A, p. 1139-1148, 1986, July.

MESSLER, R. W. **Principles of welding: Process, Physics, Chemistry and Metallurgy**. Troy, NY: John Wiley and Sons, Inc. 1999.

MISHRA, S. & DEBROY, T., **A Heat-transfer and Fluid flow- based Model to Obtain a Specific Weld Geometry Using Various Combinations of Welding Variables**. J. Appl. Phys. 98, 2005.

MODENESI, Paulo J. BRACARENSE, Alexandre Q. **Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem de Metais**. Belo Horizonte. 20014.

MODENESI, Paulo J. **Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais**. Belo Horizonte, Minas Gerais, 2015.

MURPHY, A. B. et al. **Modelling of Thermal Plasma for Arc Welding: The Role of the Shielding Gas Properties and of Metal Vapour**. Iopscience: Journal of Physics D: Applied Physics, v. 42, n. 19, p.1-20, 2009. DOI: 10.1088/0022-3727/42/19/194006.

NILES, R. W. JACKSON, E. C. **Weld Thermal Efficiency of the GTAW Process**. Welding Journal. 25s-32s. 1975.

ORLOWICZ, A. W. TRYTEK, A. TUPAJ, M. MRÓZ, M. **Thermal Coefficients of the GTAW Process**. Archives of Foundry Engineering. ISSN 1897-3310, v. 15, p. 63-68. 2015.

ORŁOWICZ, A.W. & TRYTEK, A. **Susceptibility of iron castings to heat absorption from an electric arc and to hardened-layer shaping**. Metallurgical and Materials Tanscations A 34, 2973–2984. 2003.

RAZAFINIMANANA, M. et al. **Experimental Study of the Influence of Anode Ablation on the Characteristic of an Argon Transferred Arc**. Iopscience: Plasma Sources Science and Technology, v. 4, n. 3, p.501-510, 1995. DOI: 10.1088/0963-0252/4/3/021.

RICHARDSON, O. W., **Thermionic Phenomena and the Laws Which Govern Them**. Nobel Lecture, december, 1929.

ROTH, J. R. **Industrial Plasma Engineering – Volume 1: Principles**. Institute of Physics Publishing, v. 1. Philadelphia. 1995.

SCHNICK, M. et al. **Metal Vapour Causes a Central Minimum in Arc Temperature in Gas-metal Arc Welding Through Increased Radiative Emission**. Iopscience: Journal of Physics D: Applied Physics, v. 43, n. 2, p.1-5, 2010. DOI: 10.1088/0022-3727/43/2/022001.

SGARBI, P. **Construção e Validação de um Calorímetro com Vazão Contínua de Água para Avaliação do Rendimento Térmico em Processos de Soldagem**. Dissertação

apresentada a Universidade Federal do Rio Grande do Sul para obtenção do título de Mestre em Engenharia. Porto Alegre. 2013.

STENBACKA, Nils. **On Arc Efficiency in Gas Tungsten Arc Welding**. Soldagem & Inspeção. São Paulo, v. 18, nº 4. 2013.

TSAI, N. & EAGER, T.W. **Distribution of the Heat and Current Fluxes in Gas Tungsten Arcs**. Metallurgical Transactions 16B, 841–846. 1985

ULLER, Jonas Carlo; BONACORSO, Nelso Gauze; MACHADO, Adriano Albino; FELICIANO, Christian Shikanai; ROMANI, Diego Pasquali; LAIÑO, Frederico Reales. **Processo GMAW com CO₂ Aquecido**. XLII Congresso Nacional de Soldagem (CONSOLDA), 2016.

VACQUIE, Serge. **Influence of Metal Vapours on Arc Properties**. Pure and Applied Chemistry, v. 68, n. 5, p.1133-1136, 1996.

VILARINHO, L. O.; LUCAS, B.; RAGHUNATHAN, S. **Cuidados ao se Extrair Dimensões de Fotografia/Filmagem em Soldagem**. Soldagem & Inspeção. São Paulo, Vol 14, Nº4, 2009.

WENDELSTORF, J., et al. **TIG and Plasma Arc Modelling: a Survey, in Mathematical Modelling of Weld Phenomena 3**. 1997, The Institute of Materials. p. 848-897

ZIJP, J. **Heat Transport During Gas Tungsten Arc Welding**. Mandag: Technische Universities Delft. 1990.

ANEXOS

Anexo 1

TABELA A.1- Propriedades Termofísicas do Argônio à Pressão Atmosférica
Ar, $M = 28,97$ g/mol

T(K)	ρ (kg/m ³)	C_p (kJ/(kg.K))	$\mu \cdot 10^7$ (N.s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$\lambda \cdot 10^3$ (W/(m.K))	$\mu \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
100	3,5562	1,032	71,1	2,00	9,34	2,54	0,786
150	2,3364	1,012	103,4	4,426	13,8	5,84	0,758
200	1,7458	1,007	132,5	7,590	18,1	10,3	0,737
250	1,3947	1,006	159,6	11,44	22,3	15,9	0,720
300	1,1614	1,007	184,6	15,89	26,3	22,5	0,707
350	0,9950	1,009	208,2	20,92	30,0	29,9	0,700
400	0,8711	1,014	230,1	26,41	33,8	38,3	0,690
450	0,7740	1,021	250,7	32,39	37,3	47,2	0,686
500	0,6964	1,030	270,1	38,79	40,7	56,7	0,684
550	0,6329	1,040	288,4	45,57	43,9	66,7	0,683
600	0,5804	1,051	305,8	52,69	46,9	76,9	0,685
650	0,5356	1,063	322,5	60,21	49,7	87,3	0,690
700	0,4975	1,075	338,8	68,10	52,4	98,0	0,695
750	0,4643	1,087	354,6	76,37	54,9	109	0,702
800	0,4354	1,099	369,8	84,93	57,3	120	0,709
850	0,4097	1,110	384,3	93,80	59,6	131	0,716
900	0,3868	1,121	398,1	102,9	62,0	143	0,720
950	0,3666	1,131	411,3	112,2	64,3	155	0,723
1000	0,3482	1,141	424,4	121,9	66,7	168	0,726

FONTE: INCROPERA, 2011. (p.643)

M – Massa molecular T – Temperatura absoluta ρ – Densidade C_p – Calor específico

$\mu \cdot 10^7$ – Viscosidade dinâmica $\nu \cdot 10^6$ – Viscosidade cinética λ – Condutividade térmica

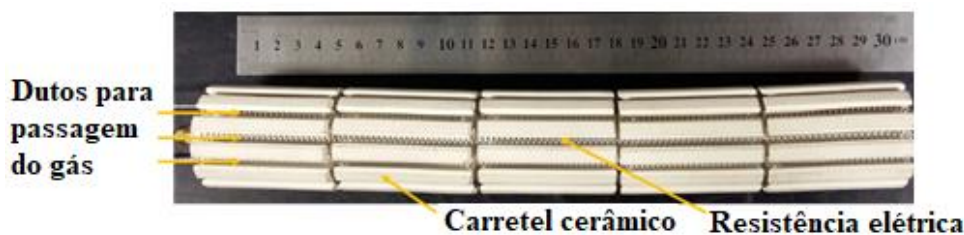
$\mu \cdot 10^6$ – Viscosidade média Pr - Número de Prandtl*

*O número de Prandtl (Pr) é um número adimensional que aproxima a razão de difusividade de momento (viscosidade cinemática) e difusividade térmica de um fluido, expressando a relação entre a difusão de quantidade de movimento e a difusão de quantidade de calor dentro do próprio fluido, sendo uma medida da eficiência destas transferências nas camadas limites hidrodinâmica e térmica. É um grupo adimensional importante para o estudo dos processos de transferência de calor por convecção (INCROPERA, 2011).

Anexo 2

Para produção do sistema de aquecimento do gás, foi utilizada uma resistência elétrica tipo espiral de níquel-cromo (80% Ni e 20% Cr) e carretéis cerâmicos, conforme Figura A-1.

Figura A-1 - Montagem da resistência elétrica nos carretéis cerâmicos.



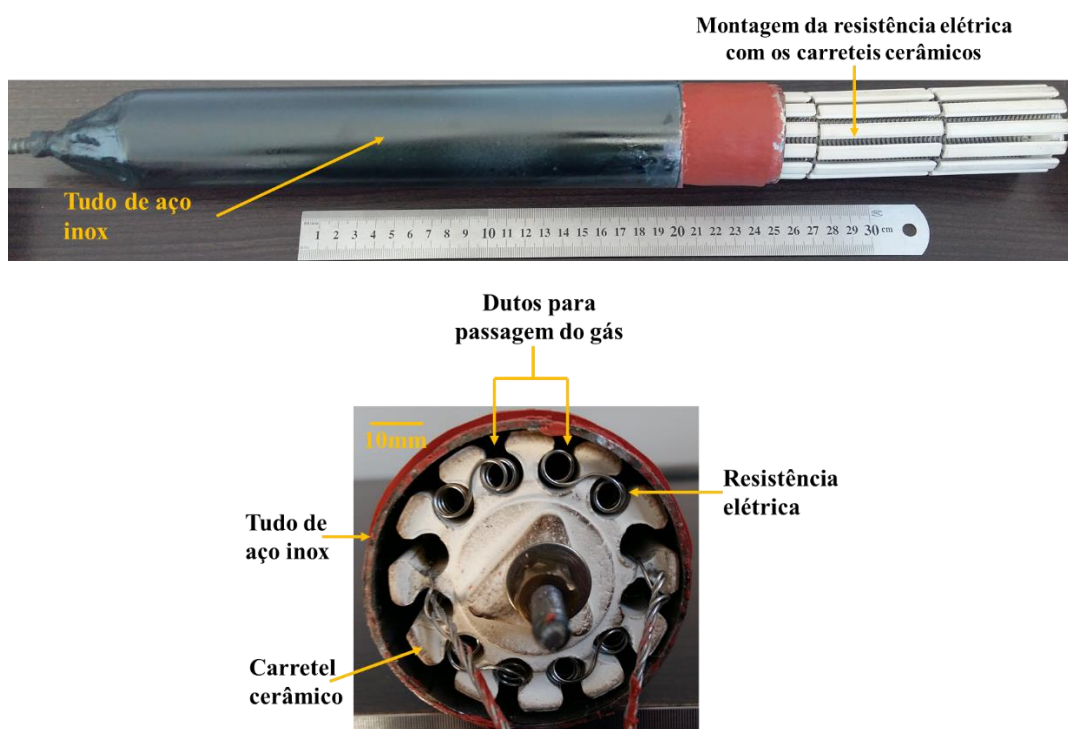
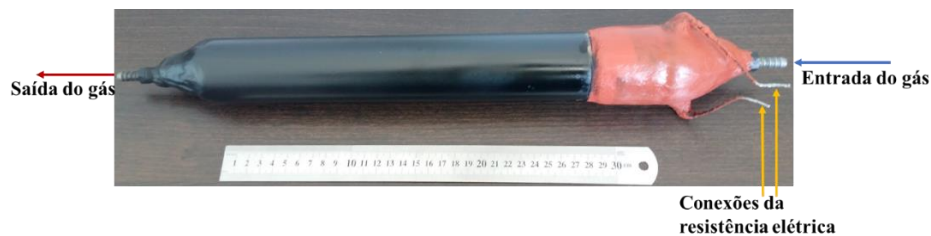
A resistência elétrica utilizada foi de 2000W de potência e trabalha em 220V de tensão. Ela foi inserida em um conjunto de cinco carretéis cerâmicos, sendo que cada carretel apresenta comprimento de 65mm e diâmetro de 47mm. Essa montagem obrigou o gás a passar pelos dutos em que se encontra a resistência, realizando o aquecimento. Além disso, a cerâmica proporcionou melhor distribuição e manutenção do calor gerado.

A montagem da Figura A-1 foi inserida em um tubo de aço inoxidável AISI 304 de diâmetro bem próximo ao dos carretéis cerâmicos (48mm) (Figura A-2), fazendo com que o gás circulasse somente nos dutos, sendo a Figura A-3 a montagem final do sistema de aquecimento por resistência elétrica.

O isolamento das conexões da resistência elétrica e o fechamento do tubo de inox foram realizados utilizando-se adesivo de silicone vermelho resistente a elevadas temperatura (320°C) da Tek Bond® (Figura A-2 (b)).

Para melhor controle da temperatura de saída do gás, foi desenvolvido um circuito elétrico tipo dimmer 4000 W SCR10-220 V Triac, em que foi possível controlar a potência média da resistência elétrica.

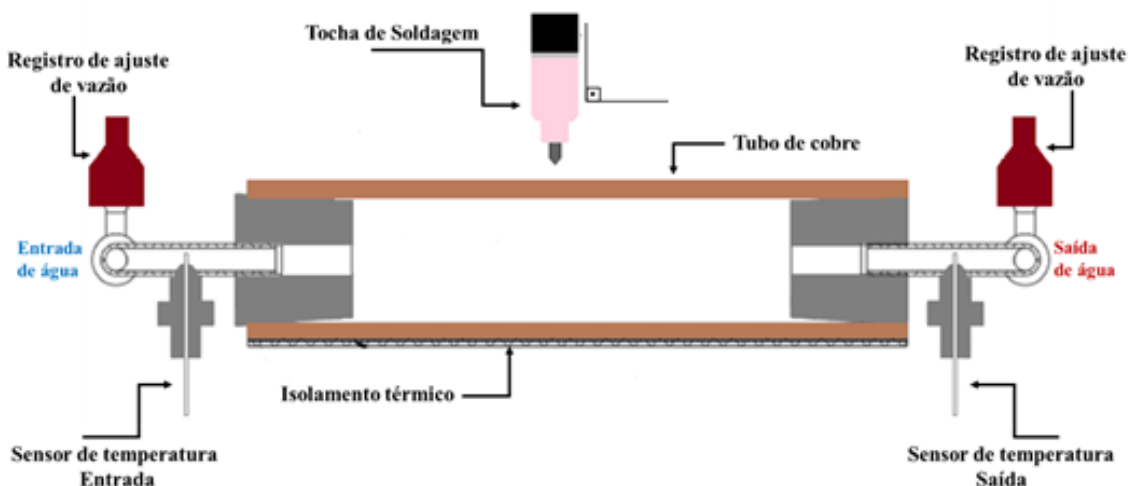
Devido a elevada temperatura de saída do gás, a mangueira polimérica de fornecimento do gás para a tocha GTAW foi substituída por uma mangueira de silicone, especificada pelo fabricante como tendo a temperatura máxima de trabalho de aproximadamente 320°C. A refrigeração da tocha foi retirada, pois proporcionava um rápido resfriamento do gás, perdendo assim o objetivo principal desse trabalho.

Figura A-2 - Montagem da resistência no tubo de aço inox**Figura A-3 - Montagem Final do sistema de aquecimento do gás de proteção.**

Anexo 3

O calorímetro utilizado neste trabalho para a medida do rendimento térmico é apresentado esquematicamente na Figura A-4. Todos os materiais utilizados e sua montagem é apresentado passo a passo a seguir.

Figura A-4 - Vista esquemático de uma seção longitudinal do calorímetro utilizado neste trabalho.



A-3.1. Corpo do Calorímetro

Para a realização dos experimentos e estimativa da eficiência da soldagem, foi utilizado tubo de cobre fosforado CA-122, com diâmetro externo de 57mm e interno de 55,42mm. O comprimento do tubo foi de 200mm, Figura 3.20. A composição química e as propriedades mecânicas do tubo são apresentadas na Tabela A-2 e A-3 (dados fornecidos pelo fabricante). Optou-se pela utilização desse tubo de cobre devido a facilidade de se encontrar no comércio e à alta condutividade térmica apresentada (385,0W/mK).

Tabela A-2: Composição química do tubo de cobre conforme dados do fabricante.

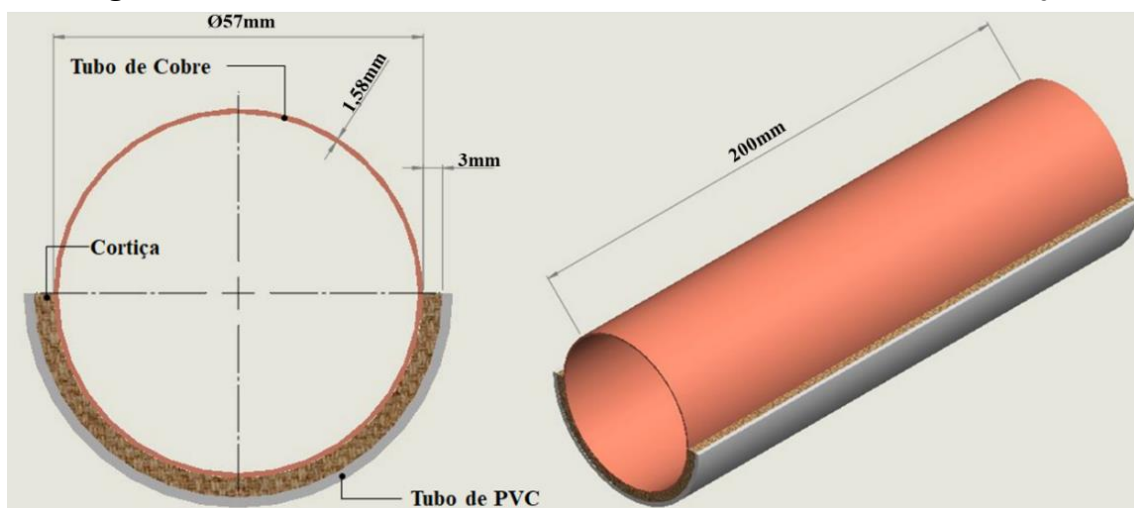
Composição Química (%)			
Característica	Encontrado	Limite Inf.	Limite Sup.
P	0,0156	0,0156	0,0400
Cu	Restante		

Tabela A-3: Propriedades mecânicas do tubo de cobre conforme fabricante.

Ensaio Físicos, Mecânicos e Metalográficos				
Característica	Unid.	Encontrado	Limite Inf.	Limite Sup.
Formatos	-	Tubo extrudado		
Liga	-	Cobre Fosforado (122)		
Têmperas	-	1/2 Duro		
Diâmetro externo	mm	55,42	55,34	55,46
Espessura	mm	1,585	1,42	1,74
Dureza Rockwell 30T	HR30T	66,5	30	
Escoamento	MPa	430	205	
Resistência a Tração	MPa	435	250	

Objetivando reduzir as perdas de calor por convecção e por radiação na superfície exposta do tubo de cobre, foi construído uma calha de PVC que envolveu a parte inferior do tudo, Figura A-5.

Devido à falta de resistência do PVC a grandes temperaturas, foi necessário a adição de uma lâmina de cortiça de 3mm de espessura no interior da calha, que foi fixada com a utilização de um adesivo de silicone para altas temperaturas. Escolheu-se a cortiça devido à sua baixa condutividade térmica, podendo variar entre 0,028W/mK e 0,045W/mK (GIL, 1998; FORTES et al, 2004), dependendo da origem do processamento a qual a cortiça foi submetida.

Figura A-5 - Tubo de cobre com isolamento térmico de PVC com cortiça.

A-3.2. Montagem do Calorímetro

Na construção do calorímetro foram utilizados tubos e conexões de policloreto de polivinila clorado (CPVC). A escolha desse material foi baseada na sua baixa condutividade térmica e ao baixo custo quando comparado com outros tubos para condução de água quente. Além disso,

esse material é leve, resistente à corrosão e permite trabalhar com fluidos em temperaturas de até 80°C. Conforme expresso pelo fabricante, o CPVC apresenta uma condutividade térmica de 0,05W/mK, um valor relativamente baixo se comparado com outros materiais, como o PVC (0,17W/mK).

Para a montagem do corpo do calorímetro, foram utilizados tubos e conexões de CPVC da linha FlowGuard® da Amanco. Foi utilizado uma tubulação com diâmetro externo nominal de 15mm e espessura de 1,6mm, visando garantir uma vazão de água continua com fluxo laminar.

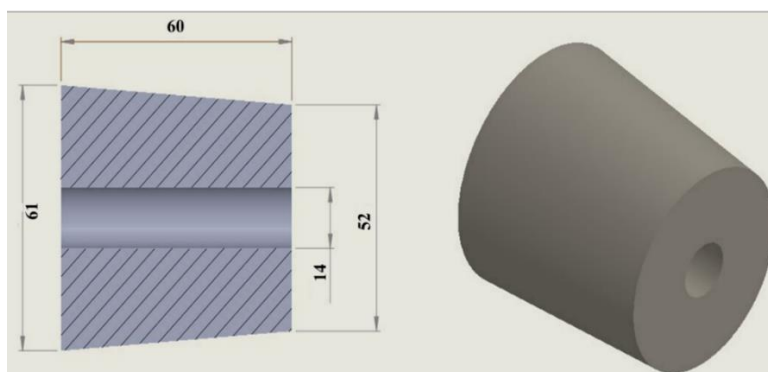
Os tubos e conexões utilizados e suas respectivas quantidades estão relacionados na Tabela A-4.

Tabela A-4: Materiais utilizados na construção do calorímetro.

Componente	Quantidade
Tubo reto	0,5m
Registro gaveta	2 un.
Joelho 90°	2 un.
Tê	2 un.
União roscável	2 un.
Tampão	2 un.
Conector com rosca 1/2"	6 un.

O acoplamento do tubo de cobre com a tubulação de CPVC do calorímetro foi realizada utilizando rolhas de borracha com um furo central passante, Figura A-6. Esse arranjo permitiu um rápido acoplamento e a utilização de tubos com diferentes diâmetros.

Figura A-6 - Vista em corte e isométrica da rolha utilizada nos experimentos (dimensões em mm).



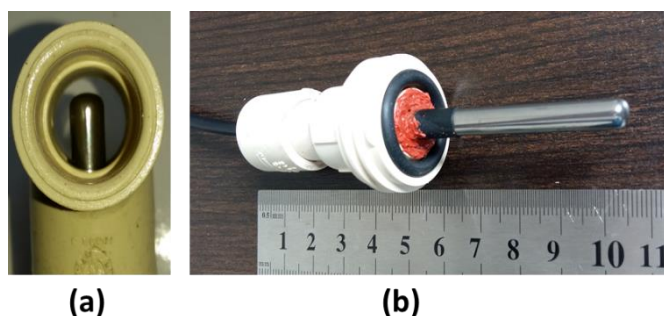
A-3.2. Monitoramento da Temperatura e Vazão da Água

O monitoramento da temperatura da água na entrada e na saída do calorímetro durante o processo de soldagem é de suma importância para o cálculo da eficiência térmica do processo.

Para realizar a medição da temperatura foi optado pela utilização de sensor de temperatura DS18B20 que apresenta tempo de atualização menor do que 750ms. A faixa de operação do sensor (-55°C a 125°C) atende as necessidades dos ensaios.

Os sensores de temperatura foram fabricados com uma proteção de aço inoxidável com diâmetro de 6mm e comprimento de 50mm, sendo que seus fios são revestidos com uma capa de PVC. Eles foram posicionados de forma que fiquem alinhados com o centro da tubulação de água (Figura A-7 (a)). Foi realizado a fixação dos sensores de temperatura em uma união roscável de CPVC com o auxílio de silicone para alta temperatura, Figura A-7 (b).

Figura A-7 - (a) Alinhamento da ponta do sensor de temperatura e (b) fixação dos sensores com o uso de adesivo de silicone.



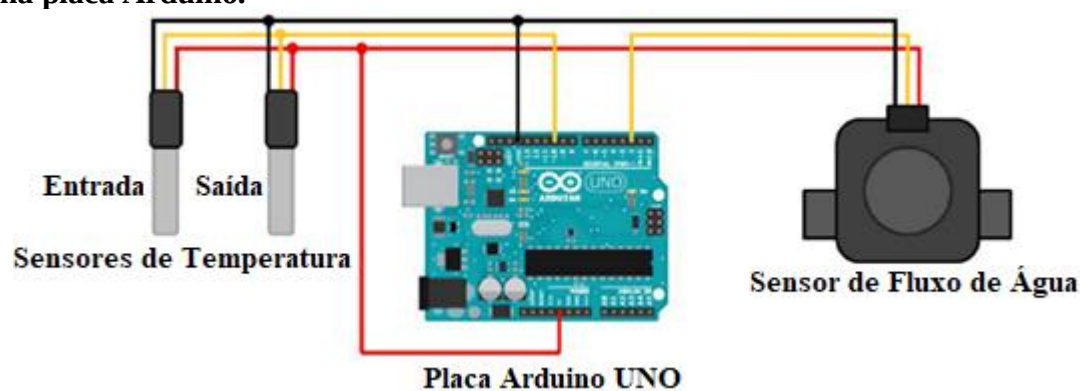
Outra variável importante para a aquisição dos dados gerados pelas análises nesse tipo de calorímetro é a vazão de água, conforme observada na Equação 3.2. Para isso foi utilizado um sensor de fluxo de ½ polegada do tipo SEN-HZ21WA. Este sensor é capaz de medir de 1 a 30 litros de água por minuto. Uma roda interna gira enquanto existe fluxo de água e através do efeito hall é feito a contagem de quantas voltas estão sendo dadas pela roda.

Para realizar o monitoramento das temperaturas e vazão utilizou-se uma placa Arduino UNO, devido a facilidade de medida e captação dos valores durante os experimentos.

Os sensores de temperatura e de vazão de água (fluxômetro) foram conectados diretamente na placa Arduino UNO, por fornecerem sinais na faixa de 0 a 5V. O programa realizou a leitura dos sensores em intervalos de 1 segundo, e logo, disponibilizou em seu “monitor serial” uma tabela contendo os valores lidos em conjunto com o tempo de leitura.

Na Figura A-8, uma montagem esquemática com os sensores de temperatura e vazão e o sistema de aquisição de dados desenvolvido a placa Arduino são representadas.

Figura A-8 - Esquema da ligação dos sensores de temperatura e fluxo de água na placa Arduino.



A programação que foi utilizada para o monitoramento e aquisição dos dados pelos sensores apresenta-se no Anexo 4.

Anexo 4

Código Fonte Arduino UNO

```
//Ligações:
//Pino 2 - Fio amarelo sensor de fluxo
//Pino 10 - Fio amarelo dos sensores de temperatura
#define pinotemperatura 10
#define pinofluxo 2
//Detalhes:
//Sensor de Fluxo de água modelo SEN-HZ21WA
//Sensor de temperatura modelo DS18B20
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
//Configura a classe do OneWire para comunicação no pino especificado:
OneWire oneWire(pinotemperatura);
//Passamos a referência do OneWire para a biblioteca dallastemperature:
DallasTemperature sensors(&oneWire);
DeviceAddress termo_entrada = { 0x28, 0xFF, 0xF4, 0x59, 0xA0, 0x16, 0x03, 0xE8 };
DeviceAddress termo_saida = { 0x28, 0xFF, 0x9F, 0x33, 0xA0, 0x16, 0x03, 0x02 };
float temperatura_entrada_instantanea;
float temperatura_saida_instantanea;
float vazao_instantanea; //Variável para armazenar o valor em L/min
volatile int contaPulso; //Variável para a quantidade de pulsos
unsigned long timer_fluxo; //timer para cálculo do período de tempo
bool habilita_medicao; //habilita medição
unsigned long timer_geral; //timer para contagem de tempo de medição
void setup ()
{
    Serial.begin (9600);
    pinMode (pinofluxo, INPUT);
    attachInterrupt (0, inpulso, RISING); //Pino 2 como interrupção externa
    Serial.println ("\n\nInicio\n\n"); //Imprime Início na serial
    //Iniciamos os sensores:
    sensors.begin ();
    sensors.setResolution (termo_entrada, 10);
    sensors.setResolution (termo_saida, 10);
}
void loop ()
{
    //Executa em intervalos de 1000ms:
    if (millis () - timer_fluxo >= 1000) {
        //Vazao instantanea, medida no último segundo:
        vazao_instantanea = contaPulso / 5.5; //Converte para L/min
        contaPulso = 0; //Reseta contador
        timer_fluxo = millis (); //Reseta timer para nova marcação de tempo
        //Tempo neste momento:
        unsigned long tempo_ms = millis () - timer_geral;
        //Medimos também as temperaturas:
        medicao_temperaturas ();

        if (habilita_medicao) {
            String linha_medicao = (String)tempo_ms + "\t" + vazao_instantanea + "\t" +
            temperatura_entrada_instantanea + "\t" + temperatura_saida_instantanea;
            Serial.println (linha_medicao);
        }
    }
}
```

```
    }
}
//leitura dos comandos via serial:
if (Serial.available () > 0) {
    byte comando = Serial.read ();
    switch (comando) {
        case 'I': inicia_medicao(); break;
        case 't': habilita_medicao = false; break;
    }
}
}
void incpulso ()
{
    contaPulso++; //Incrementa a variável de contagem dos pulsos
}
void inicia_medicao() {
    //Resetamos a variavel de tempo:
    timer_geral = millis ();
    habilita_medicao = true;
    //Imprimimos o cabeçalho da tabela:
    Serial.println ("\n\n\n\n\n");
    String cabecalho_tabela = "t\tv\tTe\tTs";
    Serial.println (cabecalho_tabela);
}
void medicao_temperaturas() {
    sensors.requestTemperatures();
    temperatura_entrada_instantanea = sensors.getTempC(termo_entrada);
    temperatura_saida_instantanea = sensors.getTempC(termo_saida);
}
//Referências:
//http://labdegaragem.com/profiles/blogs/tutorial-como-utilizar-o-sensor-de-fluxo-deagua
//https://www.arduinoecia.com.br/2013/04/sensor-de-temperatura-ds18b20-arduino.html
```