

MARCELO LEMOS ROSSI

**UMA CONTRIBUIÇÃO AO CONHECIMENTO DA
FÍSICA DO ARCO APLICADA EM SOLDAGEM**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2011**

MARCELO LEMOS ROSSI

**UMA CONTRIBUIÇÃO AO CONHECIMENTO DA FÍSICA DO ARCO
APLICADA EM SOLDAGEM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Américo Scotti

UBERLÂNDIA – MG
2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU , MG, Brasil

F383p Rossi, Marcelo Lemos, 1983-
2012 Uma contribuição ao conhecimento da física do arco aplicada
em soldagem / Marcelo Lemos Rossi. - 2011.
 81 f. : il.

Orientador: Américo Scotti.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Soldagem elétrica - Teses.
I. Scotti, Américo, 1955- II. Universidade Federal de Uberlândia.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

*Dedico este trabalho a todos que acreditaram
na conclusão dele e que me apoiaram*

AGRADECIMENTOS

Ao programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia pela oportunidade da realização deste curso e à CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

À empresa IBAR, em especial ao engenheiro Waldir Resende, pela colaboração no projeto e fornecimento de material utilizado nesse trabalho.

Ao Prof. Américo Scotti e Prof. Volodymyr Ponomarov pela orientação, ensinamentos, discussões e pela confiança depositada, ao Prof. Louriel Oliveira Vilarinho e ao Prof. Valtair Antonio Ferraresi pelos auxílios no trabalho e pela ajuda.

À equipe do Laprosolda/UFU e ao Eng. Raul Gohr Jr. da empresa IMC – Soldagem, sempre prontos para ajudarem e pelo apoio técnico.

Ao amigo Daniel Souza pelas discussões sobre física clássica, quântica e física do arco, indispensáveis para a conclusão desse trabalho.

Ao amigo André Alves de Resende pela ajuda indispensável na elaboração e discussões na parte do trabalho sobre arcos híbridos concêntricos.

Aos técnicos e amigos da oficina Carlão, Lazinho, Passarinho e Reginaldo.

E a todos os colegas de laboratório e em especial à Thonson Ferreira, Regina Paula Garcia, Víctor Augusto Nascimento, Dayana Beatriz Carmona García e Hernán Dario Hernández Arevalo pela disponibilidade em auxiliar nos experimentos e apoio.

ROSSI, M. L. **UMA CONTRIBUIÇÃO AO CONHECIMENTO DA FÍSICA DO ARCO APLICADO EM SOLDAGEM.** 2011. 81 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RESUMO

Conhecendo os fundamentos físicos que governam os processos de manufatura, é possível incrementar o desenvolvimento dos mesmos de uma forma mais rápida e eficiente. Isto se aplica também para soldagem. Porém, os fenômenos físicos que são envolvidos nos processos de soldagem não são tão esclarecidos, principalmente pela dificuldade em estudá-los de forma experimental e pela complexidade e interdependências dos mesmos. Assim, o objetivo deste trabalho foi estudar fenômenos físicos pertinentes à soldagem a arco elétrico, visando criar condições para melhora e desenvolvimento dos processos de soldagem. Especificamente, foram estudados o efeito da troca de calor do arco com o meio-ambiente sobre a queda de tensão do arco, a interação entre arcos híbridos concêntricos e o acoplamento arco-ânodo. A observação desses fenômenos em estudo foi realizada através de análise visual do comportamento do arco e dos sinais de tensão do arco, utilizando o valor da corrente como entrada do sistema. Para verificar a troca de calor do arco com o meio, procurou-se adequar a região de um arco TIG pulsado a um meio quase adiabático e comparou-se o comportamento da tensão deste arco com a condição de arco aberto à atmosfera. Verificou-se uma maior demanda de energia para o arco aberto ao ambiente. Nos estudos com arcos híbridos, utilizou-se uma tocha especial contendo eletrodos concêntricos, permitindo a criação de um arco dentro de outro, com regulagens independentes de parâmetros. Verificou-se que em arcos concêntricos, apesar de visualmente se caracterizarem como dois arcos, a tensão em cada um comporta-se como a de um arco único, pois a alteração energética imposta a um deles leva a uma interferência transitória no outro, até uma acomodação de ambos. Já em relação ao estudo do acoplamento arco-ânodo, compararam-se condições de um arco TIG sobre ânodos refratário (grafite) e não-refratário (cobre), ambos refrigerados. Os resultados mostraram como os vapores metálicos oriundos somente de ânodos não refratários modificam a forma de acoplamento do arco, que passa a ser por vários pontos geradores de vapores ao invés de uma área única.

Palavras chaves: Arco; Transferência de calor; interação eletromagnética; vapores metálicos; acoplamento

ROSSI, M. L. **A CONTRIBUTION TO THE KNOWLEDGE OF ARC'S PHYSICS APPLIED IN WELDING.** 2011. 81 f. M.Sc. Dissertation, Federal University of Uberlandia, Uberlandia.

ABSTRACT

With knowledge of the manufacturing process it is possible to improve their development in a faster and more efficient way. This is also applicable to welding. However, the physics that are involved in welding processes are not well known, because of the difficulty to study them experimentally and by the complexity and interdependence with different factors. Thus, the objective of this work is to investigate some physical phenomena relevant to the welding arc, in order to improve the understanding of fundamentals in this area and to provide conditions for improvement and development of welding processes. Specifically, the effects of the arc heat exchange with the environment, the interaction between hybrid concentric arcs and arc-anode coupling were studied. The observations of these effects in the arc were performed by visual analysis and by its voltage, using the current as the input to the system. In the studies of the effects of the arc heat exchange with the environment was used a pulsed TIG arc in a quasi-adiabatic container and its voltage were compare the voltage a pulsed TIG arc in an open environment, with it was possible to verify that an open arc needs more energy. For the studies of the hybrids arc were used a special torch containing concentric electrodes, with it was possible to create an arc within another and each arc with independent setup, verified that in concentric arcs, although visually could be seen two arcs, them voltage behaves as they were a single one because by changing the energy of one arc leads to a transient interference on both arcs' energy before reaching a steady state. In the studies of the arc-anode coupling, was compared a TIG welding conditions on refractory anode (graphite) and non-refractory anode (copper and steel) with both refrigerated. The result shows that metal vapors from non-refractory anode modify the arc-anode coupling and in the non-refractory anode appear several metal vapor generators for arc-anode coupling instead of single area as happens in the refractory anode.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Cópia da imagem do experimento com arco elétrico de Davy (DAVY, 1812)	4
Figura 2.2 - Linha do tempo do surgimento dos processos de soldagem (REIS; SCOTTI, 2007)	5
Figura 2.3 – Instabilidades no processo Plasma-MIG causadas por curtos-circuitos entre o eletrodo consumível e a peça, retirado de Resende (2009)	9
Figura 2.4 - Exemplo do oscilograma da soldagem contínua na velocidade de alimentação de 2,05 m/min para uma variação de tensão entre 12 e 21 V utilizando proteção de Ar + 8% CO ₂ , retirado de Souza (2010).....	10
Figura 2.5 - Espectro emitido pelo arco de uma soldagem sobre uma placa de cobre resfriada à água e utilizando o processo TIG como gás de proteção Ar puro (MENDONÇA, ALFARO & BORGES, 2007)	12
Figura 3.1 - Esquema da montagem completa do sistema de medição	16
Figura 3.2 - Placa de aquisição modelo NI USB-6009 com resolução de 14 bits e faixa de medição de ± 10 V (NATIONAL INSTRUMENTS, 2009a).....	17
Figura 3.3 - Interface condicionadora de sinal projetada e construída no Laprosolda/UFU (painel externo acima e circuitos internos abaixo). Modificado de Souza (2010)	17
Figura 3.4 - Transdutor para medição de corrente baseado no efeito Hall.....	18
Figura 3.5 - Uma voltagem V dá origem a uma corrente I na direção positiva de x. A resistência ôhmica é V / I . Um campo magnético na direção positiva z deflete os portadores de carga positiva na direção negativa de y. isto gera um potencial de Hall (VH) e uma resistência de Hall (VH / I) na direção de y (BERTULANI, 2009).....	19

Figura 3.6 - Esquema da montagem do sensor Hall no condicionador de sinal. A fonte de tensão de 15 V que alimenta o sensor faz parte da caixa condicionadora de sinais, Souza (2010)	20
Figura 3.7 - Circuito do condicionador de sinal do sensor Hall.....	20
Figura 3.8 -Circuito elétrico do condicionador de sinal do efeito Hall: (a) Projeto da placa de circuito impresso e (b) placa com os componentes instalados	20
Figura 3.9 - Circuito do divisor de tensão.....	21
Figura 3.10 - Circuito elétrico do divisor de tensão: (a) Projeto da placa de circuito impresso e (b) placa com os componentes instalados	21
Figura 3.11 - Esquema de montagem para calibração do sistema de aquisição de sinais (a relação entre os valores de corrente e tensão obtidos nos multímetros é que gera a curva de calibração).....	22
Figura 3.12 - Interface do programa com o usuário	23
Figura 3.13 - Código fonte do programa	23
Figura 3.14 - Desenho esquemático do circuito elétrico do processo GMAW: U_{circ} = tensão no circuito, L = indutância da fonte, R_p = resistência parasita, R_b = resistência entre o bico de contato e o arame, R_a = resistência do arame, R_g = resistência da gota e L_a = queda de tensão na coluna do arco (Terasaki e Simpsom, 2006)	25
Figura 3.15 - Desenho esquemático do circuito elétrico do processo TIG: U_{circ} = tensão no circuito, R_p = resistência parasita, R_b = resistência entre a pinça e o eletrodo, R_a = resistência do eletrodo e L_a = queda de tensão na coluna do arco (adaptado de Terasaki e Simpsom (2006))	25
Figura 3.16 - Desenho esquemático do circuito elétrico do processo TIG e do posicionamento dos terminais de medição de tensão utilizada para medir a tensão: U_{circ} = tensão no circuito, R_p = resistência parasita, R_b = resistência entre a pinça e o eletrodo, R_a = resistência do eletrodo, terminal+ = valor da tensão medida em relação à tensão de referência, terminal- = valor de referência para a medição da tensão e L_a = queda de tensão na coluna do arco,. Adaptado de Terasaki e Simpsom (2006).....	26
Figura 3.17 - Posicionamento do terminal de medição de tensão em uma tocha TIG	27

Figura 3.18 - Equipamentos e comprimento do eletrodo utilizado no experimento para medir a queda de tensão em um eletrodo de tungstênio com 2% de tória	28
Figura 3.19 - Desenho esquemático para medir o valor da queda de tensão na resistência do eletrodo e na resistência pinça-eletrodo: Pinça 1 = pinça da tocha ligada ao terra da maquina de soldagem, Pinça 2 = pinça da tocha ligada ao positivo da maquina de soldagem.....	28
Figura 3.20 - Montagem do experimento utilizado para realizar os testes para medir a queda de tensão de um eletrodo de tungstênio com 2% de tória, o perfil envolve o eletrodo e impede a perda do gás de proteção	29
Figura 3.21 - Primeiro teste para tentar medir a queda de tensão no eletrodo com a corrente de 200 A. O eletrodo não suportou a elevada temperatura e em pouco tempo curvou-se devido aos esforços referentes à montagem	30
Figura 3.22 - Segundo teste para tentar medir a queda de tensão no eletrodo com a corrente de 200 A. O eletrodo não suportou a elevada temperatura e se rompeu, antes de completar os 3 minutos esperado nos outros testes	30
Figura 3.23 - Valores das quedas de tensão medidas no experimento e a linha de tendência dos pontos obtidos	30
Figura 4.1 - Tijolo refratário isolante utilizado com um bocal de tocha TIG preso a ele, através de uma argamassa refratária, para formar um meio quase-adiabático para um arco TIG.....	36
Figura 4.2 - Representação esquematica do processo de isolamento do arco: a esquerda, o arco em um ambiente aberto e o calor perdido pela coluna de plasma; a direita, o arco com o isolamento	36
Figura 4.3 - Comprimento do eletrodo e do arco para os testes de referência e no meio quase-adiabático	37
Figura 4.4 - Bancada utilizada para os experimentos com o arco em um ambiente quase-adiabático	38
Figura 4.5 - Esquema de abertura do arco quando o mesmo deverá se estabelecido dentro de um meio quase-adiabático	38

Figura 4.6 - Oscilograma com o comportamento da tensão para um processo TIG pulsado com a corrente em forma de onda quadrada variando de 35 a 100 A, para um período de onda de 6 s (os valores de tensão do arco para o meio quase-adiabático são ligeiramente menores aos valores de tensão de referência)	40
Figura 4.7 - Valores das tensões médias nos intervalos da Figura 4.6 em que agia a corrente de pulso (100 A) para um período de 6 s, o último conjunto de barras representa a média de todos os intervalos.....	40
Figura 4.8 - Valores das tensões médias nos intervalos da Figura 4.6 em que agia a corrente de base (35 A) para um período de 6 s, o último conjunto de barras representa a média de todos os intervalos.....	41
Figura 4.9 - Forma de onda da tensão para um processo TIG pulsado com a corrente em forma de onda quadrada variando de 35 a 100 A. A pulsação utilizada tem um período de onda de 1 s (os valores de tensão do arco para o meio quase-adiabático são ligeiramente menores aos valores de tensão de referência)	42
Figura 4.10 - Valores das tensões médias nos intervalos da Figura 4.9 durante a corrente de pulso (100 A), o último conjunto de barras representa a média de todos os intervalos	42
Figura 4.11 - Valores das tensões médias nos intervalos da Figura 4.9 durante a corrente de base (35 A), o último conjunto de barras representa a média de todos os intervalos	43
Figura 4.12 - Forma de onda da tensão para um processo TIG pulsado com a corrente em forma de onda quadrada, variando de 35 a 100 A. A pulsação utilizada tem um período de onda de 0,1 s (os valores de tensão do arco para o meio quase-adiabático são ligeiramente menores aos valores de tensão de referência)	44
Figura 5.1 -Fotografia da bancada experimental utilizada	48
Figura 5.2 - Vista esquemática dos principais elementos da tocha Plasma-MIG. 1 – Bico de contato MIG/MAG; 2 – Isolamento cerâmico; 3 – Eletrodo Plasma; 4 – Bocal constrictor Plasma; 5 – Bocal Externo (RESENDE 2009)	49
Figura 5.3 - Exemplo de uma tocha comercial para o processo Plasma-MIG de fabricação da empresa TBi. 1 - Corpo da tocha; 2 – Bico de contato MIG/MAG; 3 -	

Eletrodo Plasma; 4 - Bocal constrictor; 5 - Bocal externo; 6 - Mangueiras de refrigeração por água e para passagem da proteção gasosa externa. (RESENDE 2009)	50
Figura 5.4 - Bico de contato MIG/MAG adaptado para o experimento e o eletrodo TIG utilizado (a ponta foi arredondada por ser W puro e os ensaios serem realizados com CC com o eletrodo no polo positivo)	50
Figura 5.5 - Montagem experimental para o estudo dos arcos híbridos(a ponta arredondada do eletrodo devido a ser W puro em CC+)	51
Figura 5.6 - Oscilograma de corrente apresentando o problema devido a ordem de início dos processos (plasma sendo ignitado antes do TIG)	52
Figura 5.7 - Oscilograma de tensão referente ao oscilograma da Figura 5.6	53
Figura 5.8 - Eletrodos Plasma apresentando desgaste excessivo por serem utilizados na polaridade negativa após curto período de teste.....	54
Figura 5.9 - Comportamento do arco quando a corrente é inferior a 20 A. O arco surge na lateral do eletrodo	55
Figura 5.10 - Vista esquemática do posicionamento dos principais elementos da tocha Plasma-MIG modificada para acomodar o eletrodo TIG: DTP = Distância da Tocha a Peça; RP = Recuo do eletrodo Plasma; RM = Recuo do bico de contato MIG/MAG adaptado; DBCP = Distância do Bico de Contato MIG/MAG à Peça; EP= Comprimento do eletrodo que possivelmente será envolvido pelo arco Plasma; AT = comprimento do arco TIG (Adaptado de RESENDE 2009)	56
Figura 5.11 - Oscilograma de corrente das fontes Plasma e TIG (fonte do Plasma regulada para 30 A e a fonte TIG regulada para pulsar entre 20 e 50 A, com tempo de pico e de base de 1 s).....	57
Figura 5.12 - Oscilograma de tensão referente ao oscilograma da Figura 5.11, demonstrando a influência que um arco exerce na tensão do outro	58
Figura 5.13 - Oscilograma de corrente das fontes Plasma e TIG (Fonte do Plasma regulada para 45 A e fonte TIG regulada para pulsar entre 20 e 40 A, com tempo de pico e de base de 0,5 s).....	59

Figura 5.14 -Oscilograma de tensão referente ao oscilograma da Figura 5.13, demonstrando a influência que um arco exerce na tensão do outro.....	60
Figura 5.15 - Oscilograma de corrente das fontes do Plasma e do TIG (Fonte do Plasma regulada para 60 A e fonte TIG regulada para pulsar entre 20 e 50 A, com tempo de pico e de base de 1 s).....	60
Figura 5.16 - Oscilograma de tensão referente ao oscilograma da Figura 5.15, demonstrando fusão do eletrodo TIG no intervalo de 26 a 30 s e a influência do arco TIG na tensão do arco Plasma	61
Figura 5.17 - A esquerda parte de um eletrodo que não se modificou; no meio, eletrodo utilizado somente com TIG; à direita, o eletrodo utilizado no arco híbrido Plasma-TIG (sua superfície ficou tão brilhante que refletiu a câmera que formou a imagem de um circulo preto nele)	62
Figura 5.18 - Formato do arco híbrido, desde o instante de sua criação (arco embrionário) até a estabilização do processo	63
Figura 5.19 - Possível caminho dos elétrons que dessa forma provocaram a limpeza dos óxidos da superfície do eletrodo.....	64
Figura 6.1 - Ânodo de cobre com o inserto de grafite (a figura à esquerda mostra todo o conjunto com o sistema de entrada e saída de água, enquanto à direita se mostra em detalhes o inserto de grafite utilizado).....	66
Figura 6.2 - Espectrômetro do fabricante Spectral Products, modelo SM 242, com faixa de medição de 200 a 850 nm e resolução de 0,31 nm (SPECTRAL PRODUCTS, 2011)	66
Figura 6.3 - Pontos de acoplamento arco-cobre (ânodo) para correntes de 50 A, 70 A e 100 A.....	70
Figura 6.4 - Característica estática dos arcos, quando o ânodo é o cobre e quando é o grafite, para um comprimento de arco 17 mm.....	72
Figura 6.5 - Valores da queda de tensão de um arco de 80 A em função do seu comprimento e da espessura da chapa.	73
Figura 6.6 - Espectrografia de arcos TIG sobre o cobre (acima) e sobre o aço (baixo).....	74

Figura 6.7 - Indícios de vapores de cobre junto ao ânodo (coloração verde), obtidos em experimentos com arco TIG de 20 A e comprimento de 17 mm sobre chapa de cobre..... 75

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Medida das quedas de tensão e o valor da queda de tensão por comprimento de eletrodo e tungstênio	31
Tabela 3.2 - Medida das quedas de tensão e o valor da resistividade elétrica do eletrodo e tungstênio	31
Tabela 4.1 - Indicação dos valores médio da queda de tensão dos testes e a diferença do valor medido quando o arco estava no meio de referência e no meio quase-adiabático	45
Tabela 6.1 - Formas do acoplamento do arco sobre o cobre e sobre o grafite sob diversas correntes	68

LISTA DE SÍMBOLOS

- As = área da superfície do eletrodo
At = área da seção transversal do eletrodo
AT = comprimento do arco TIG
DBCP = distância do bico de contato MIG/MAG à peça
DTP = distância da tocha a peça
EP = comprimento do eletrodo que possivelmente será envolvido pelo arco plasma
h = coeficiente local de convecção
hm = coeficiente de convecção médio
I = corrente que circula pelo eletrodo
K = condutividade térmica do eletrodo
L = indutância da fonte
La = queda de tensão na coluna do arco
Q = calor gerado por efeito Joule
Qc = calor perdido por condução do eletrodo para as pinças
Qv = calor perdido por convecção para a atmosfera por meio do gás de proteção
Ra = resistência do eletrodo
Rb = resistência entre o bico de contato com o eletrodo
Rg = resistência da gota
RM = Recuo do bico de contato MIG/MAG adaptado
Rp = resistência parasita
RP = Recuo do eletrodo Plasma
terminal- = valor absoluto da tensão na chapa de teste
terminal+ = valor absoluto da tensão na pinça
Te = maior temperatura do eletrodo
 T_{\inf} = temperatura do gás de proteção
Tp = temperatura das pinças
Ts = temperatura da superfície do eletrodo
Ucirc = tensão no circuito elétrico do processo de soldagem
Um = tensão medida no processo de soldagem

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	1
1 INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 <i>Uma Breve História do Arco Elétrico e da Soldagem</i>	3
2.2 <i>O Arco Elétrico e o Plasma</i>	6
2.3 <i>O Arco Elétrico em Soldagem</i>	7
2.4 <i>Métodos de Estudo do Arco</i>	7
2.4.1 Estudo do Arco Através de Sinais elétricos.....	8
2.4.2 Espectroscopia Óptica de Emissão.....	11
2.5 <i>Efeito de Vapores Metálicos do Anodo no Arco</i>	12
CAPÍTULO III	15
3 EQUIPAMENTOS E MÉTODOS	15
3.1 <i>Sistema de Medição de Sinais Elétricos</i>	15
3.1.1 Placa de Aquisição.....	16
3.1.2 Transdutores/Condicionadores de Sinal	17
3.1.3 Sensor Hall.....	18
3.1.4 Divisor de Tensão (DTS).....	21
3.1.5 Calibração dos Transdutores/Condicionadores de Sinais.....	22
3.1.6 Programa de Aquisição de Dados.....	22
3.2 <i>Metodologia para Análise do Arco pelo Sinal de Tensão</i>	24
3.2.1 Somatória das Quedas de Tensão da Pinça-Eletrodo (R _b) e do Eletrodo (R _a)	27
3.2.2 Discussão Geral	32
CAPÍTULO IV	35
4 ESTUDO DA TROCA DE CALOR DO ARCO COM O MEIO AMBIENTE.....	35
4.1 <i>Procedimento Experimental</i>	35
4.2 <i>Resultados</i>	39
4.3 <i>Discussão Geral</i>	44

CAPÍTULO V	47
5 ESTUDO DOS ARCOS EM PROCESSO DE ARCOS HÍBRIDOS CONCÊNTRICOS	47
5.1 <i>Equipamentos</i>	48
5.1.1 Bancada Experimental	48
5.1.2 Tocha Plasma-MIG	49
5.1.3 Adaptação da Tocha para o Experimento	50
5.1.4 Fontes de Soldagem para Experimento	51
5.1.5 Gases para o Processo	53
5.2 <i>Procedimento Experimental</i>	53
5.3 <i>Resultados</i>	57
5.4 <i>Discussão Geral</i>	62
CAPÍTULO VI	65
6 ESTUDO DO MATERIAL DO ÂNODO NO ACOPLAMENTO ARCO-ÂNODO	65
6.1 <i>Técnicas experimentais</i>	65
6.2 <i>Procedimento Experimental</i>	67
6.3 <i>Resultados</i>	67
6.4 <i>Discussão Geral</i>	75
CAPÍTULO VII.....	77
7 CONCLUSÕES	77
CAPÍTULO VIII.....	79
8 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	79
CAPÍTULO IX	81
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

Capítulo I

INTRODUÇÃO

A melhora permanente na produtividade e na qualidade do produto é objetivo primordial em qualquer processo de fabricação, o que não é viável sem estudos mais profundos dos mesmos. Muitos trabalhos têm sido desenvolvidos buscando a otimização dos processos de manufatura através de procedimentos sistemáticos, como planejamento estatístico e modelamento matemático/computacional, de forma a se obter ganhos ainda maiores nos processos de fabricação. Com a adição dos conhecimentos dos fenômenos físicos que governam os processos é possível aperfeiçoar essa busca, reduzindo, assim, custos da execução de um planejamento experimental. Desta forma, o bom entendimento dos fundamentos do processo de manufatura, em especial à soldagem, é de grande importância.

Os processos de soldagem são classificados em dois grandes grupos, a saber, Soldagem por Pressão e Soldagem por Fusão. Desses dois grupos de processos, o mais utilizado é o de soldagem por fusão, em especial os processos de fusão a arco. Assim, pode-se destacar o arco elétrico como um dos principais elementos do processo de soldagem, já que é o responsável pelo calor da fusão necessária para a união. Por isto, a compreensão dos fenômenos físicos que envolvem o arco de soldagem é fundamental para o estudo e para a aplicação do processo. Vilarinho (2009) sugere em seu trabalho que um melhor entendimento da física do arco pode levar à melhora dos processos de soldagem e, até mesmo, no desenvolvimento de novas tecnologias. Coerentemente, obras e cursos de soldagem normalmente introduzem os conceitos da física do arco antes de se descrever os processos propriamente ditos, como feito no livro de Scotti & Ponomarev (2008).

Apesar dos primeiros registros sobre o estudo do arco elétrico se referirem aos trabalhos de Humphry Davy, por volta de 1812 (AYRTON, 1902), até hoje esse assunto tem muitos aspectos obscuros. Isto se deve, além da física do arco de soldagem ser uma disciplina de difícil compreensão teórica, a grande dificuldade da medição das propriedades físicas do meio, sem causar interferência em sua estrutura nem a destruição dos

instrumentos de medição. Costa (2003) cita que o estudo experimental do arco elétrico deve ser realizado principalmente de forma indireta, já que as condições no arco são extremamente agressivas e a introdução dos instrumentos de medição no arco tende a perturbar de forma significativa as condições dele. Ainda segundo esse autor, o estudo tanto experimental como teórico do arco é, em geral, bastante complicado e é, por isso, que muitos aspectos ainda permanecem pouco compreendidos.

A caracterização da dificuldade na compreensão dos fenômenos relativos à física do arco pode se dar por duas citações de definições do arco. Segundo Choudhuri (1998), o arco elétrico em soldagem compreende uma região relativamente pequena do espaço ($\sim 100 \text{ mm}^3$), caracterizada por elevadas temperaturas ($\sim 20.000\text{K}$), forte radiação eletromagnética (em especial luminosa e ultravioleta), fluxo intenso de matéria e elevados gradientes de propriedades físicas. Ainda segundo este autor, o arco elétrico é um exemplo de plasma (assim como o núcleo do sol, o interior de lâmpadas fluorescentes, chamas e a ionosfera). De acordo com Chen (1985), o plasma é definido com um gás ionizado composto por elétrons, íons e átomos neutros, sendo um conjunto quase-neutro de partículas, que satisfazem certos critérios.

Para contribuir com uma melhor compreensão do arco de soldagem, esse trabalho se propõe a estudar a influência de alguns elementos externos sobre o comportamento do arco, tanto do ponto de vista energético, estudando a troca de calor do arco com o meio ambiente e a interação entre arcos concêntricos, como do ponto de vista fenomenológico, estudando efeitos que os vapores metálicos podem ter sobre o acoplamento arco-ânodo.

Capítulo II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 UMA BREVE HISTÓRIA DO ARCO ELÉTRICO E DA SOLDAGEM

Em março de 1800, Alessandro Volta descobriu a pilha elétrica (APS – NEWS, 2006). Suas publicações foram recebidas com bastante entusiasmo por diversos pesquisadores, o que levou, de acordo com Ayrton (1902), a uma febre de pesquisas sobre eletricidade e artigos e mais artigos sobre a pilha e eletricidade foram publicados. Os temas dos primeiros experimentos com eletricidades subdividiam-se em três classes: os efeitos da eletricidade em seres vivos; processos que produziam decomposição química de matéria inorgânica, particularmente da água (eletrólise); e experimentos com aquecimento pela corrente, em especial aqueles que criavam faíscas por contato ou por rompimento de circuitos. Esta ultima classe de experimentos é que levou à descoberta do arco elétrico.

Ainda no começo do século XIX, após melhorias no funcionamento da pilha e em meio aos estudos sobre faíscas elétricas, surgem publicações sobre o arco elétrico, porém não há registros da data de sua descoberta nem do pesquisador responsável. Segundo Ayrton (1902), o primeiro registro sobre o arco elétrico possivelmente foi publicado na revista “Monthly Magazine” e o segundo registro se encontra no livro de Sr. Humphry Davy “Elements of chemical philosophy”. Davy (1812) descreve em seu livro um experimento no qual ele consegue criar uma “chama elétrica” (como o arco elétrico foi conhecido na época) que conseguia fundir, rapidamente, metais que na época não eram possíveis de serem fundidos. A chama elétrica de Davy foi criada em um aparato onde dois eletrodos eram dispostos na horizontal. A Figura 2.1, que foi retirada das anotações desse pesquisador, mostra o aparato utilizado por Davy para criar a “chama elétrica”. Essa “chama” passou a ser conhecida como Arco Elétrico (Ayrton, 1902; Davy, 1812), devido ao seu formato de arco, causado pelo movimento convectivo dos gases.

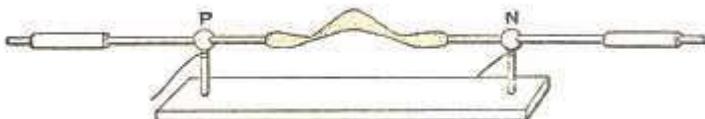


Figura 2.1 - Cópia da imagem do experimento com arco elétrico de Davy (DAVY, 1812)

Pelo trabalho de Ayrton (1902), tem-se que no período de 1812 a 1838 não houve importantes trabalhos com o arco, até que em 1838, Gassiot mostrou que a temperatura no eletrodo negativo (de grafite) é menor do que a do eletrodo positivo e, em conjunto com Walker, Sturgeon e Mason, realizaram trabalhos sobre a condutividade elétrica e sobre o comportamento do arco na presença de campos magnéticos. Nestes trabalhos, foi mostrado que o arco elétrico possuía cargas e que essas cargas podiam ser afetadas por campos magnéticos.

Em 1856, Henry Bessemer patenteia um novo processo de produção de aço que aumenta a sua resistência e permite a sua produção em escala verdadeiramente industrial (Bessemer, 1905). Esta inovação foi o que levou à necessidade de se criar uma técnica de união de peças de aço também mais produtiva, sem a necessidade de utilizar elementos mecânicos para a união, como parafusos. Assim, após muitas experiências com a novidade tecnológica da época, o inglês Wilde obteve a primeira patente de soldagem por arco elétrico em 1865 ao unir, com sucesso, duas pequenas peças de ferro passando uma corrente elétrica através de ambas as peças e produzindo uma solda por fusão.

A necessidade de outros processos de soldagem levou a Bernardos e Olezewski a desenvolver o primeiro processo de soldagem a arco elétrico (LANCASTER, 1987), processo no qual um arco era aberto entre um eletrodo de carbono e a peça a ser soldada e o material da junta era adicionado por uma vareta, semelhante ao processo de soldagem TIG. Ainda segundo Lancaster (1987), o processo de Bernardos e Olezewski evoluiu quando, de forma independente, Slavianoff, na Rússia, e Coffin, nos Estados Unidos da América, sugeriram a substituição do eletrodo de carvão por eletrodo metálico nu.

Entretanto, a solda ainda era a parte mais frágil das peças, devido a contaminações da junta por nitrogênio e oxigênio da atmosfera, o que levou ao desenvolvimento de elementos que ao serem queimados no arco criavam uma proteção gasosa contra os contaminantes da atmosfera. Neste sentido, em 1904, o engenheiro Oscar Kjellberg desenvolveu um método de revestir o eletrodo metálico com esses elementos que protegiam o arco, criando, assim, o processo de soldagem com eletrodo revestido, hoje ainda um dos processos de soldagem mais utilizados (ESAB, 2005).

Mais tarde outros processos de soldagem foram desenvolvidos. Em 1930 foi patenteado o processo de soldagem a arco submerso e em 1935 foi proposta a utilização de gases inertes para a proteção dos processos de soldagem. Em 1940, processos protegidos

por gases inertes foram usados na prática, quando foi desenvolvido um processo semelhante ao de Bernardos e Olezewski, porém substituindo o eletrodo de carbono por um eletrodo de tungstênio e utilizando o argônio como gás de proteção (processo conhecido hoje como TIG, Tungsten Inert Gas, ou GTAW, Gas Tungsten Arc Welding). O TIG foi usado inicialmente na produção de aeronaves, sendo aplicado na soldagem de liga de magnésio (Lancaster, 1987). Mais tarde outros processos de soldagem mais sofisticados foram desenvolvidos. A evolução dos processos de soldagem pode ser visto na Figura 2.2, adaptada e atualizada por Reis e Scotti (2007), a partir de Okumura e Taniguchi (1982).

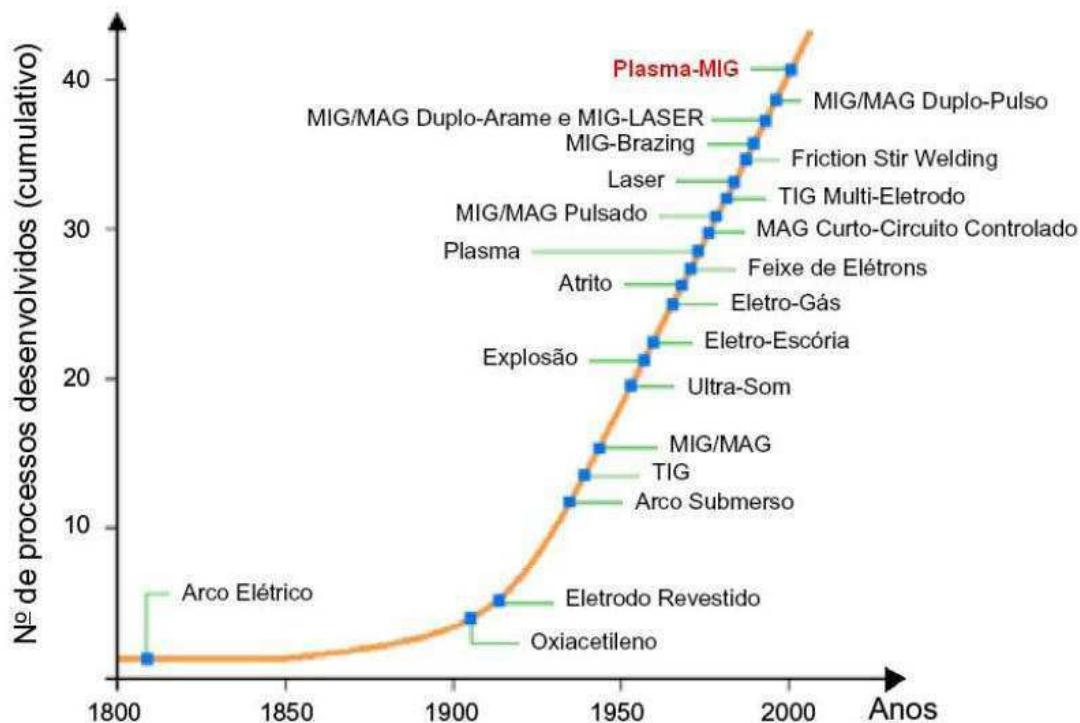


Figura 2.2 - Linha do tempo do surgimento dos processos de soldagem (REIS; SCOTTI, 2007)

Atualmente, o arco elétrico é a fonte de calor mais comumente utilizada na soldagem por fusão de materiais metálicos e, segundo Modenesi (2009), os motivos para isso são as ótimas características, que incluem uma concentração adequada de energia para a fusão localizada do metal de base, a facilidade de controle, o baixo custo relativo do equipamento e um nível aceitável de riscos à saúde dos seus operadores. Desta forma, os processos de soldagem a arco possuem uma grande importância industrial, sendo utilizados na fabricação dos mais variados componentes e estruturas metálicas e na recuperação de um grande número de peças danificadas ou desgastadas.

2.2 O ARCO ELÉTRICO E O PLASMA

Segundo Lancaster (1986), o arco elétrico pode ser considerado como uma descarga de eletricidade mantida entre dois eletrodos, envolvidos por um gás ou vapores dos eletrodos, e a corrente que atravessa o arco pode ter praticamente qualquer valor, desde que seja superior ao valor mínimo de 1 ampère.

Uma característica comum aos gases é a de serem não condutores de eletricidades em condições normais (SCOTTI; PONOMAREV, 2008). Entretanto, sob condições favoráveis, gases e vapores podem se ionizar, passando para o quarto estado da matéria (denominado de plasma) e, assim, passam a conduzir corrente elétrica. Desta forma, o arco elétrico é constituído em meio com plasma (ou gás altamente ionizado) por onde se conduz eletricidade.

Porém, nem todos os gases ionizados podem ser chamados de plasma, pois sempre há um pequeno grau de ionização em todos os gases (CHEN, 1985). Ainda se segundo Chen, uma definição aceitável para plasma é “um gás *quasineutral*, partículas com cargas e partículas neutras, que apresentam um ‘comportamento coletivo’”. Para este autor, *Quasineutral* implica que em um plasma a quantidade de cargas negativas é a mesma para as cargas positivas, estando ele eletricamente neutro, sendo que os elementos de cargas opostas estão separados a uma distância conhecida como comprimento de Debye, que é “a distância em partes da qual uma separação significativa das cargas pode ter lugar”, o que impede a combinação das cargas positivas com as negativas.

Para o entendimento de “comportamento coletivo”, considere as forças que atuam em uma molécula de, digamos, ar normal. Como a molécula é neutra, não há nenhuma força resultante eletromagnética e a força da gravidade é desprezível. A molécula move-se tranquilamente até que ocorra uma colisão com outra molécula. Essas colisões entre as moléculas é que governam o movimento das partículas neutras. Por exemplo, a forças aplicadas a um gás neutro por um alto-falante, gerando ondas sonoras, são transmitidas de uma partícula à outra através das colisões.

Segundo Chen (1985), a situação é totalmente diferente em um plasma, que tem partículas carregadas. Como essas partículas carregadas se movimentam, eles podem gerar concentrações locais de carga positiva ou negativa, que dão origem a campos elétricos. Os movimentos dessas cargas também geram correntes e, portanto, campos magnéticos. Ambos os campos gerados afetam o movimento das outras partículas.

2.3 O ARCO ELÉTRICO EM SOLDAGEM

Segundo Costa (2003), sob um ponto de vista macroscópico, o arco pode ser considerado como um conversor de energia, pois a energia é suprida de uma maneira controlada através de meios elétricos e, então, convertida em calor e em várias formas de radiação eletromagnética, sendo que a natureza do processo de conversão e o subsequente comportamento do arco são determinados por uma larga quantidade de condições físicas prevalecentes (tipo de gás, composição do eletrodo, geometria, etc.).

Pelas definições encontradas na AWS (1987), pode-se considerar que o arco elétrico de soldagem como um condutor gasoso que transforma energia elétrica em calor. Ainda segundo a AWS (1987), a possibilidade de concentrar e controlar o calor do arco possibilitou o desenvolvimento de inúmeros processos de soldagem utilizando o arco elétrico como fonte de calor para a fusão dos materiais.

2.4 MÉTODOS DE ESTUDO DO ARCO

O arco elétrico de soldagem compreende uma região relativamente pequena de espaço, região esta caracterizada por temperaturas elevadas, emissão em uma ampla faixa de radiação eletromagnética, fluxo intenso de matéria e grandes gradientes de propriedades físicas. Assim, o estudo tanto experimental como teórico do arco é, em geral, bastante complicado. Mas o estudo do arco é de especial interesse da soldagem, pois é a fonte de energia mais utilizada para esse processo de fabricação.

Para estudar o arco de soldagem, é necessário medir suas propriedades físicas. Os valores dessas propriedades físicas podem ser obtidos através de métodos diretos ou indiretos.

Exemplos de métodos para a determinação de quedas de tensão em arco de forma direta é a utilização de uma sonda de tensão. Essa sonda, conhecida como sonda de Langmuir, é um tipo de eletrodo que é preparado para entrar rapidamente na estrutura agressiva do arco e fazer a medição da tensão em um ou vários pontos de interesse do arco. Uma série metodologia para a utilização de sondas de tensão foram desenvolvidos/descritos por vários pesquisadores (Lenivkin et al. (1978), Lenivkin et al. (1989), Topchiy et al. (1973) e Ponomarev et al. (1997)). Normalmente, as sondas utilizadas são constituídas por um arame de tungstênio com diâmetro em torno de 0,1 a 0,35 mm, inserida em um tubo de quartzo de diâmetro menor que 1,3 mm, no qual a ponta do arame sai ligeiramente do tubo. A desvantagem desse método é que o arco é um elemento muito sensível e, com isso, a introdução da sonda irá interferir nas propriedades do arco.

Como exemplo de método indireto, pode-se citar o trabalho de Costa (2003), que desenvolveu duas técnicas para medir a queda de tensão nas zonas anódica mais catódica e da coluna de plasma em arcos MIG/MAG, tanto com transferência por curto-círcito quanto por voo livre, utilizando apenas os oscilogramas de corrente e tensão do processo, obtidos de forma a não interferir nas propriedades do arco.

Para medir as quedas de tensão das estruturas de um arco em um processo de transferência por voo livre, Costa (2003) utiliza-se de duas premissas, de que a variação da tensão por unidade de comprimento do arco é constante para uma dada condição de soldagem e que o somatório das quedas de tensão das regiões anódica mais catódica é a mesma para arcos de comprimentos diferentes, desde que sejam estabelecidos com a mesma corrente média e demais condições de soldagem. Desta forma, ao variar o comprimento do arco para a mesma condição de soldagem, o autor demonstra que é possível obter os valores da queda de tensão das zonas catódica mais anódica ao extrapolar os resultados para um arco de comprimento nulo e utilizando a variação da tensão é possível medir a queda de tensão da coluna de plasma.

Já para no processo com transferência por curto-círcito, Costa (2003) sugere que em um instante logo após o fim do curto-círcito obtém-se um arco composto apenas pelas zonas catódica mais anódica e com os resultados após a estabilização do arco, obtém-se a queda de tensão das três regiões. Com os resultados, segundo o autor, é possível obter o valor da queda de tensão da coluna de plasma, ao subtrair o valor da queda de tensão do arco estável pela queda de tensão das zonas catódica mais anódica.

2.4.1 ESTUDO DO ARCO ATRAVÉS DE SINAIS ELÉTRICOS

Segundo Costa (2003), a busca por explicações consistentes sobre fenômenos que ocorrem nos arcos de soldagem tem levado muitos pesquisadores a desenvolver e/ou adequar metodologias que possibilitem identificar propriedades inerentes à estes arcos. O estudo do arco através de sinais elétricos (valores de tensão e corrente) é um método que tenta relacionar as condições e parâmetros de soldagem com a energia desprendida pelo arco como um todo, ou seja, identificar fenômenos que ocorrem durante a soldagem pela variação dos sinais de tensão e corrente.

A análise dos parâmetros elétricos do arco é uma técnica relativamente simples e comumente utilizada, inclusive em operações de produção para controle de qualidade. Por outro lado, uma análise mais elaborada da variação dinâmica dos sinais elétricos pode fornecer dados importantes sobre os processos no arco elétrico. Para isto, contudo, dispositivos de medição com tempos de resposta extremamente rápidos devem ser

utilizados. Com a utilização de equipamentos de resposta rápida é possível registrar o comportamento da corrente e da tensão em oscilogramas para posterior análise do comportamento dos fenômenos físicos envolvidos no processo de soldagem.

Através da análise dos oscilogramas de corrente e tensão é possível detectar fenômenos envolvendo o arco durante a soldagem. Resende (2009) conseguiu registrar e apontar instabilidades do arco além de defeitos e falhas no cordão de solda de alguns de seus testes (Figura 2.3), enquanto que Souza (2010), através de uma varredura de parâmetros de soldagem, conseguiu encontrar a faixa de tensão mais adequada para o seu trabalho com o processo MIG/MAG (Figura 2.4), ambos fazendo análises dos oscilogramas de corrente e tensão.

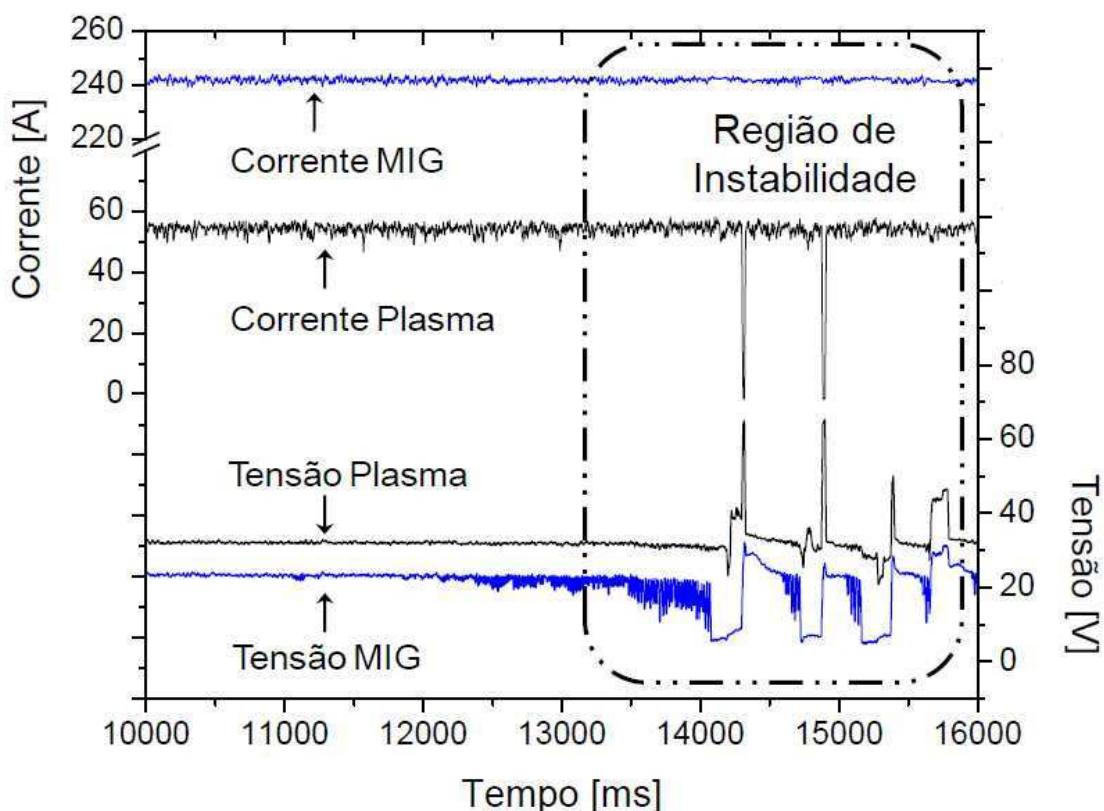


Figura 2.3 – Instabilidades no processo Plasma-MIG causadas por curtos-circuitos entre o eletrodo consumível e a peça, retirado de Resende (2009)

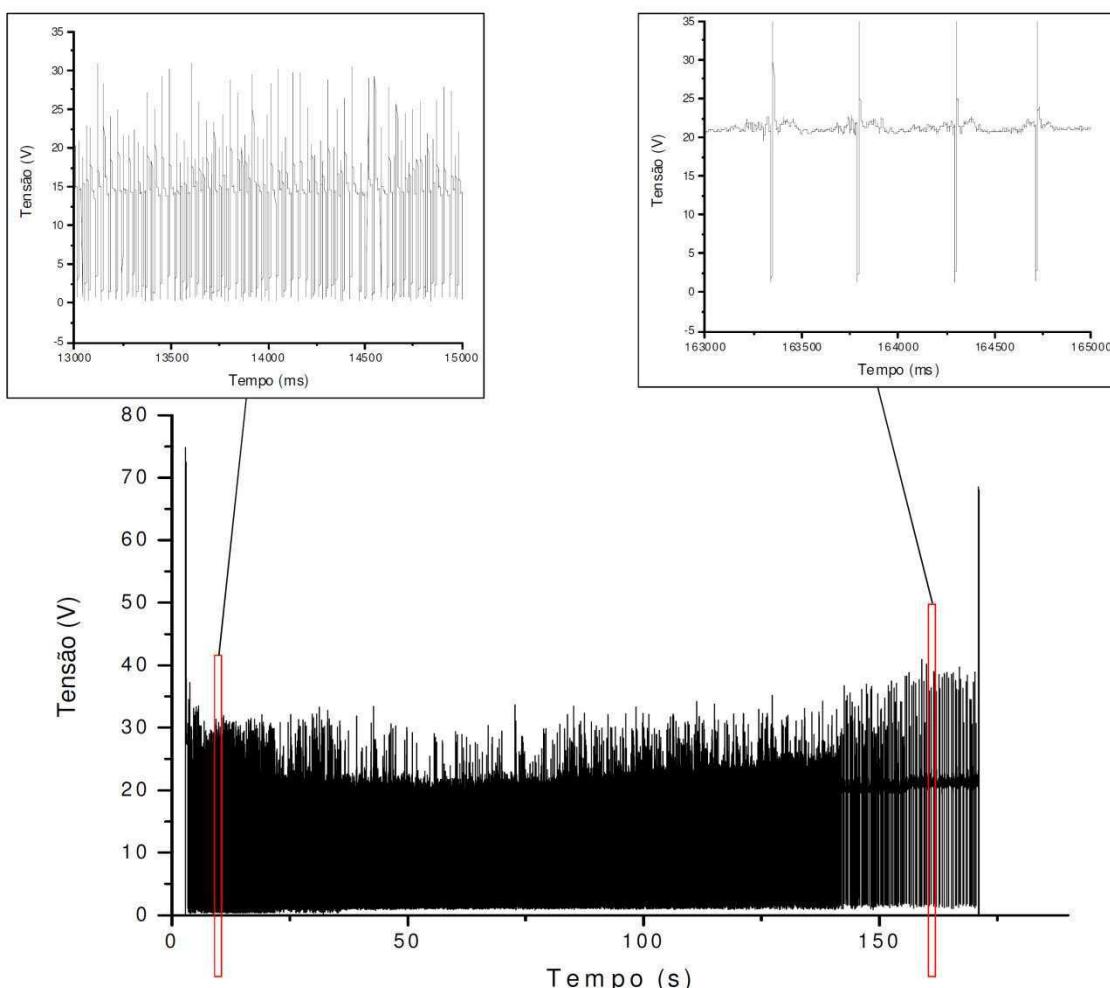


Figura 2.4 - Exemplo do oscilograma da soldagem contínua na velocidade de alimentação de 2,05 m/min para uma variação de tensão entre 12 e 21 V utilizando proteção de Ar + 8% CO₂, retirado de Souza (2010)

Apesar de ser um processo simples, deve-se tomar cuidado com a forma de obter os sinais de corrente e tensão. Os sinais de corrente são mais simples de serem obtidos, sendo, normalmente, obtidos através de shunts ou através transdutores de Efeito Hall. A facilidade de obter o valor da corrente é devido ao funcionamento desses dois dispositivos, podem ser colocados em qualquer parte do circuito elétrico, sem causar interferências que possam modificar as condições do arco.

Já a obtenção dos valores de tensão não é tão fácil como os de corrente. Segundo Hayt & Buck (2008), só é possível medir o potencial de um ponto em relação a outro, e que em um circuito elétrico é comumente chamado de queda de tensão. Como o objeto de estudo é o arco elétrico, deve-se posicionar as sondas de tensão o mais próximo o possível das zonas anódica e catódica do arco, de forma a obter apenas a queda de tensão referente ao arco.

Segundo Scotti, Ponomarev & Costa (2006), métodos diretos de medir a queda de tensão tendem a perturbar de forma significativa as condições do arco. A inserção de

sondas no interior do arco pode causar um desequilíbrio térmico e elétrico na região do arco que envolve a sonda modificando as condições físicas dessa região. Outro problema é que as condições no arco são extremamente agressivas (elevadas temperaturas) o que pode levar a destruição da sonda. Diante disto, tornando necessária a realização de estudos experimentais do arco elétrico de forma indireta, principalmente.

2.4.2 ESPECTROSCOPIA ÓPTICA DE EMISSÃO

Segundo Bebiano (2008), a espectroscopia é um conjunto de técnicas para estudar a emissão, absorção e difusão da radiação de uma substância ou meio. Com o conhecimento das emissões do arco, é possível calcular a temperatura do plasma utilizando o método da intensidade relativa das linhas espetrais (GRIEM, 1997), método de Fowler-Milne (VILARINHO; SCOTTI, 2004) e outros métodos.

De acordo com Griffiths (1994), sempre que se excita uma substância com uma fonte de energia, esta poderá transmitir, emitir ou absorver radiação em determinado comprimento de onda característico à substância e à energia de excitação. Quando um átomo absorve energia pode, ocorre a excitação de um elétron que busca um nível de energia superior. De acordo com Barbosa (2007), em uma fração de segundos ($\sim 10^{-8}$ s) o elétron volta para um estado de mais baixa energia (relaxação). Ainda segundo este último autor, este processo ocorre entre dois níveis quânticos e depende da probabilidade de transição e das regras de seleção deduzidas pela equação de Schrödinger.

A energia emitida na relaxação é conhecida como fóton e tem uma determinada frequência ou comprimento de onda. Segundo Bebiano (2008), um dado elemento químico pode se apresentar em vários comprimentos de onda diferentes, porém, eles são exclusivos, ou seja, um determinado comprimento de onda observado está diretamente relacionado a somente um elemento químico. Como pode existir mais de um elemento químico no arco elétrico, por exemplo, em função do gás de proteção, pode ocorrer uma sobreposição das linhas de emissão, dando origem ao espetro de emissão. Um exemplo de um espetro emitido por um plasma em que o elemento principal ionizado é o argônio é mostrado na Figura 2.5.

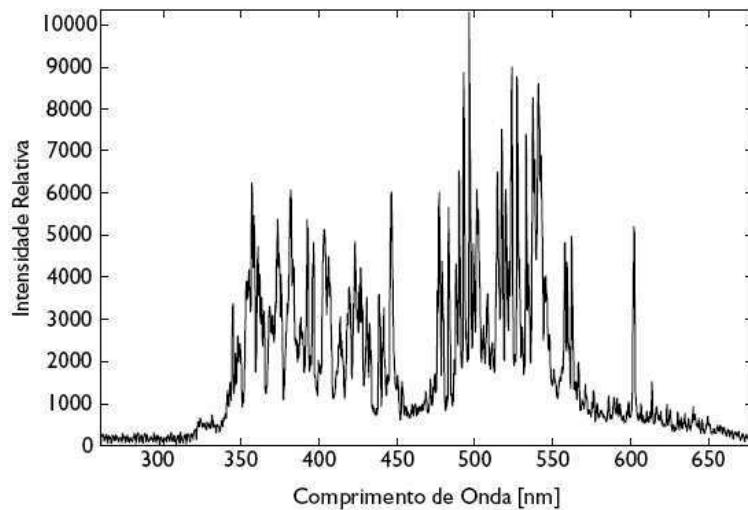


Figura 2.5 - Espectro emitido pelo arco de uma soldagem sobre uma placa de cobre resfriada à água e utilizando o processo TIG como gás de proteção Ar puro (MENDONÇA, ALFARO & BORGES, 2007)

Ainda segundo Beibiano (2010), dois tipos de análises podem ser feitos por espectroscopia: qualitativo e quantitativo. No primeiro, é possível identificar os elementos presentes no plasma, enquanto o segundo corresponde à monitoração de intensidades das linhas espectrais escolhidas. Nesse último caso, é possível obter outras informações, como calcular a Temperatura Eletrônica do plasma.

De acordo com Barbosa (2007), a espectroscopia de emissão é uma importante técnica para identificação de espécies atômicas, moleculares e iônicas formadas em plasma e suas quantidades relativas quando os parâmetros de descarga são variados. Após a obtenção do espectro de emissão de um arco, é possível identificar os elementos que compõem o arco comparando as linhas de emissão (os arrepiados da Figura 2.5) com um banco de dados contendo as informações de diversos elementos. Pode-se obter um banco de dados contendo diversas informações sobre os elementos químicos e inclusive seus espectros de emissão no National Institute of Standards and Technology (NIST), sendo essas informações disponíveis, de maneira livre, no site da instituição (http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html).

Segundo Souza (2010), a espectroscopia de emissão é uma técnica não evasiva, que tem como vantagem principal a de estudar o plasma sem perturbar as condições originais equilíbrio.

2.5 EFEITO DE VAPORES METÁLICOS DO ANODO NO ARCO

Segundo Guile (1970), o arco elétrico pode ser descrito como sendo uma descarga elétrica entre eletrodos através de um meio gasoso e ou, até mesmo, de vapores gerados a

partir desses. Como o arco é conectado ao circuito elétrico através do cátodo e do ânodo, eles podem influenciar nas características físicas do arco.

De acordo com Lu et al. (2006), na soldagem o arco e a poça de fusão estão acoplados de forma que não pode-se estuda-los separadamente, pois segundo estes autores a poça de fusão é criada na peça devido a ação do arco e ao mesmo tempo deformações, vaporizações e fluxos na superfície da poça irão afetar as propriedades do arco. Murphy (2010a) descreve em seu trabalho que vapores metálicos têm uma influência significativa, e em alguns casos dominante, em diversas aplicações que envolvem o plasma, incluindo soldagem.

Murphy (2010a) ainda apresenta que em soldagens TIG os vapores metálicos são originados na poça da fusão e apenas uma pequena quantidade faz parte da composição do arco. Além disso, segundo o mesmo autor, os movimentos convectivos do arco, próximo a poça de fusão, tendem a empurrar os vapores para fora do arco.

Allum (1983 apud QUIGLEY et al., 1973) apresenta que para arcos TIG de 100 A com 8 mm de comprimento, não apresentam vapores metálicos acima de 2 mm do anodo. Enquanto que Murphy (2010b) apresenta a pequena quantidade de vapor medido encontrando 0,075% de mol a 1 mm acima do ânodo e 0,046% a 2 mm acima do ânodo.

Apesar da quantidade de vapores metálicos ser pequena e próxima à poça de fusão, diversos estudiosos (CRESSAULT et al., 2008; CHEMINAT e ANDANSON, 1985; VACQUIE, 1996; RAZAFINIMANANA et al., 1995; MURPHY et al., 2009; SCHNICK et al., 2010) demonstram que eles alteram as propriedades físicas do arco. Dentre as alterações as que destacam mais são o aumento da condução elétrica e o aumento da radiação (emissividade eletromagnética).

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

Capítulo III

EQUIPAMENTOS E MÉTODOS

3.1 SISTEMA DE MEDAÇÃO DE SINAIS ELÉTRICOS

Para atender os objetivos deste trabalho, foram realizadas análises dos sinais de tensão do arco, sinais estes obtidos de forma indireta, ou seja, sem a utilização de uma sonda ao longo do arco (de forma a não interferir em suas propriedades). Para tal, foi montado em sistema constituído pelos seguintes componentes, ilustrado pela Figura 3.1.

- Sistema de soldagem;
- Sensor de corrente do tipo Hall;
- Sensor de tensão;
- Condicionador de sinal de corrente;
- Condicionador de sinal de tensão;
- Placa de aquisição NI 6009 (conversão A/D e interface com o computador);
- Software em ambiente LabView para o registro dos dados.

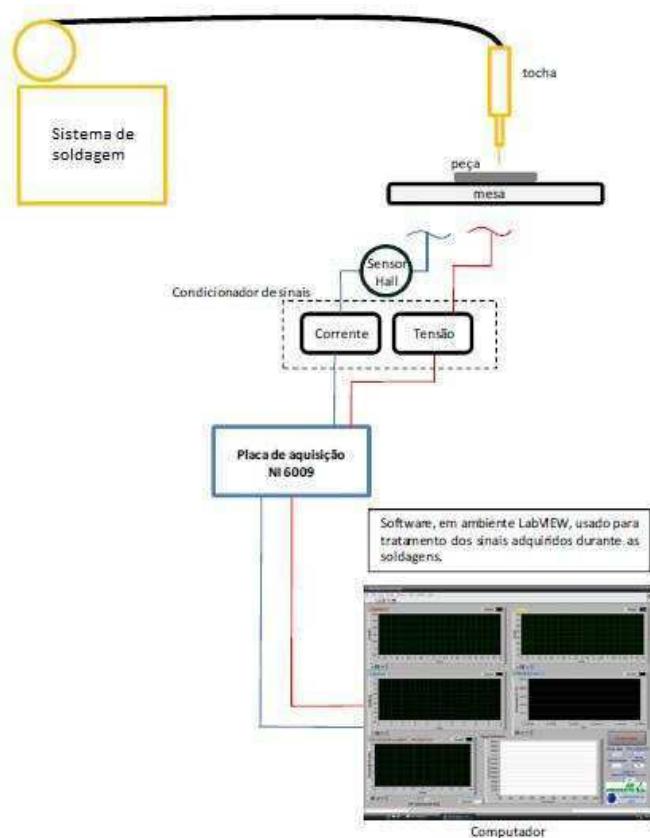


Figura 3.1 - Esquema da montagem completa do sistema de medição

O sistema de medição consiste em um microcomputador ligado a uma placa de aquisição. A placa de aquisição é responsável pela coleta dos sinais de tensão e corrente, conversão A/D desses sinais e envia esses valores para o computador. Em cada etapa do trabalho, o sistema de aquisição foi montado para coletar os sinais de forma dedicada. Os componentes serão detalhados nos itens a seguir.

3.1.1 PLACA DE AQUISIÇÃO

A placa de aquisição utilizada é do fabricante National Instruments e suas características técnicas principais são apresentadas na Figura 3.2.



Figura 3.2 - Placa de aquisição modelo NI USB-6009 com resolução de 14 bits e faixa de medição de ± 10 V (NATIONAL INSTRUMENTS, 2009a)

3.1.2 TRANSDUTORES/CONDICIONADORES DE SINAL

Para condicionamento dos sinais de corrente e tensão, para este trabalho, foi utilizado um condicionador de sinais semelhante ao utilizado por Souza (2010) (Figura 3.3). O condicionador tem como função preparar os sinais elétricos em níveis adequados para entrarem na placa de aquisição. Para isto, o condicionador de sinal é provido de um ganho ao sinal de tensão vindo de um sensor Hall (utilizado para medir a corrente do arco) e um divisor e isolador da tensão que é tomada diretamente entre o eletrodo e a chapa de teste para medir a tensão do arco. Uma breve descrição deste equipamento será dada a seguir.

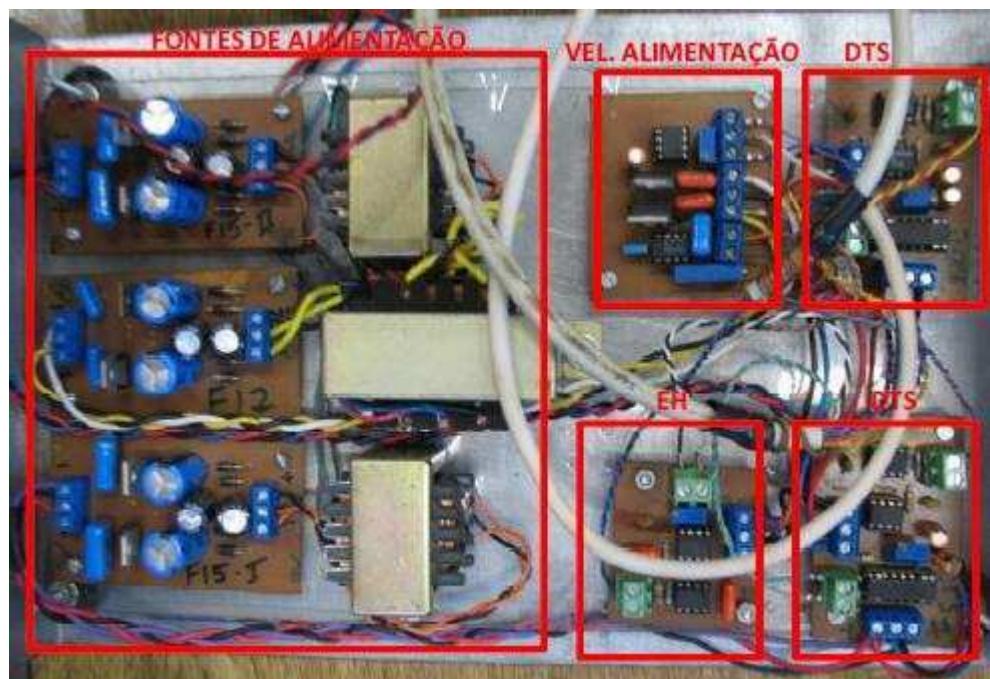


Figura 3.3 - Interface condicionadora de sinal projetada e construída no Laprosolda/UFU (painele externo acima e circuitos internos abaixo). Modificado de Souza (2010)

3.1.3 SENSOR HALL

Para aquisição do sinal da corrente do arco foi utilizado um transdutor de corrente que funciona segundo princípio do efeito Hall. Tal transdutor, então, transforma um valor de corrente de soldagem que passa por ele em um valor de tensão proporcional a corrente. O sensor utilizado é da marca LEM Transducers modelo HT 500-S8D e possui faixa de medição de ± 500 A (Figura 3.4).



Figura 3.4 - Transdutor para medição de corrente baseado no efeito Hall

Em 1879 Edwin H. Hall descobriu um fenômeno inesperado. Ele observou que, se uma fina placa de ouro for colocada em um campo magnético perpendicular à sua superfície uma corrente elétrica fluindo ao longo da placa pode causar uma diferença de potencial em uma direção perpendicular tanto ao campo magnético quanto à corrente, (Figura 3.5). Este fenômeno ficou conhecido de efeito Hall. Isso acontece porque as partículas eletricamente carregadas (neste caso, elétrons) movendo-se em um campo magnético são influenciadas por uma força e defletidas lateralmente (BERTULANI, 2009).

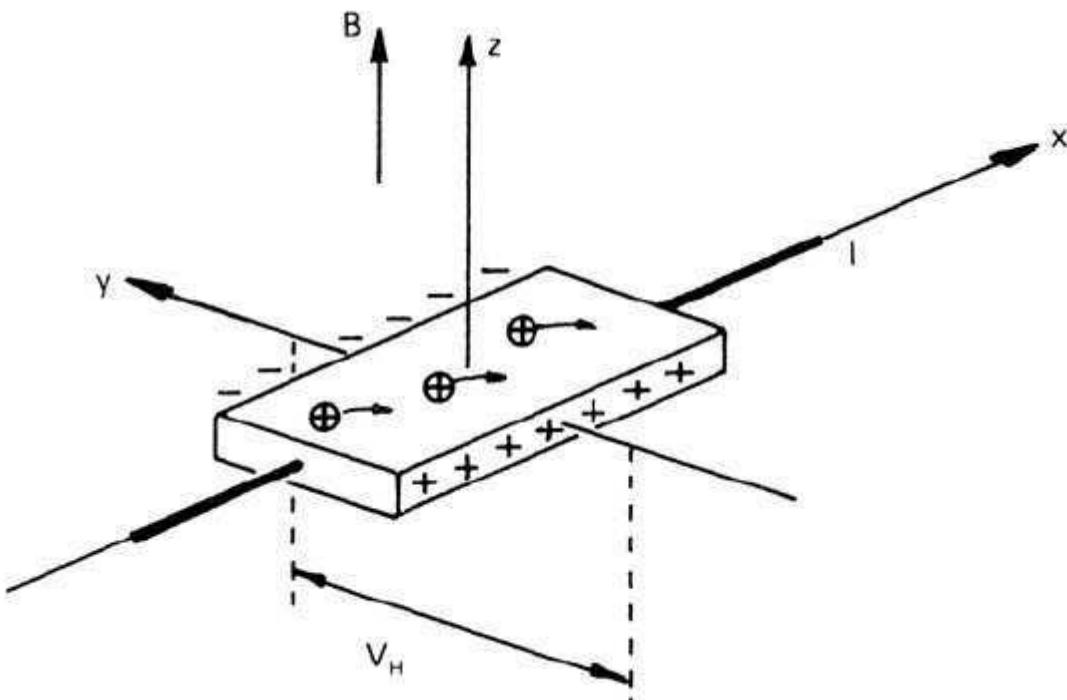


Figura 3.5 - Uma voltagem V dá origem a uma corrente I na direção positiva de x . A resistência ôhmica é V / I . Um campo magnético na direção positiva z deflete os portadores de carga positiva na direção negativa de y . isto gera um potencial de Hall (V_H) e uma resistência de Hall (V_H / I) na direção de y (BERTULANI, 2009)

Para condicionamento do sinal de saída do sensor Hall é utilizado um circuito elétrico que tem a função principal aumentar o valor de tensão de saída deste sensor antes de entrar na placa de aquisição. A Figura 3.6 apresenta um diagrama de bloco da montagem geral do sensor e condicionador de sinal, enquanto a Figura 3.7 apresenta o diagrama do circuito do condicionador de sinal do sensor Hall, onde pode se verificar, entre outros componentes, a existência de um filtro do tipo passa-baixa com frequência de corte de 1000 Hz. A Figura 3.8 mostra o projeto da placa de circuito impresso e uma fotografia do circuito do condicionador de sinais pronto.

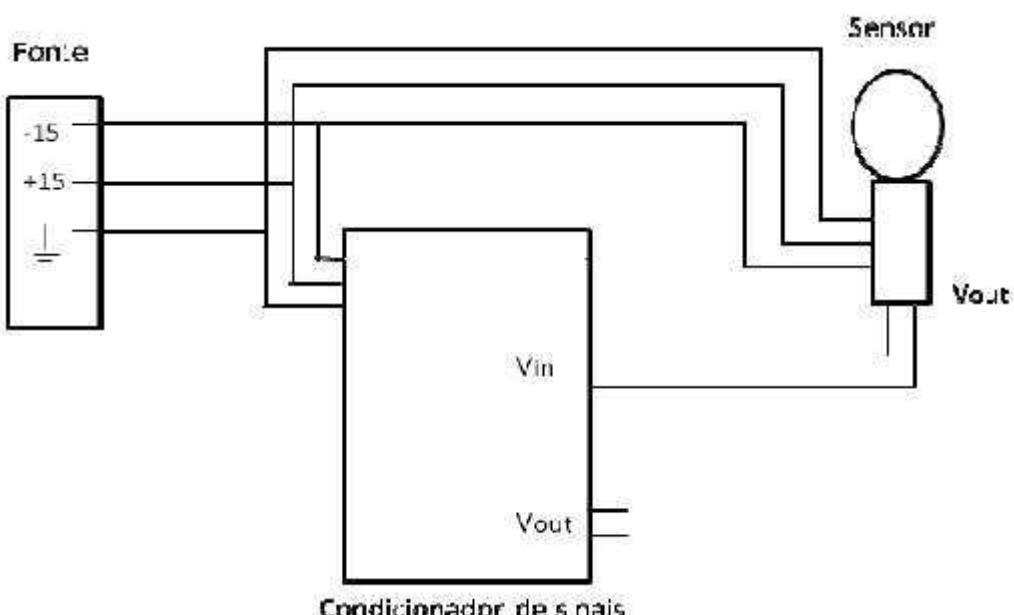


Figura 3.6 - Esquema da montagem do sensor Hall no condicionador de sinal. A fonte de tensão de 15 V que alimenta o sensor faz parte da caixa condicionadora de sinais. Souza (2010)

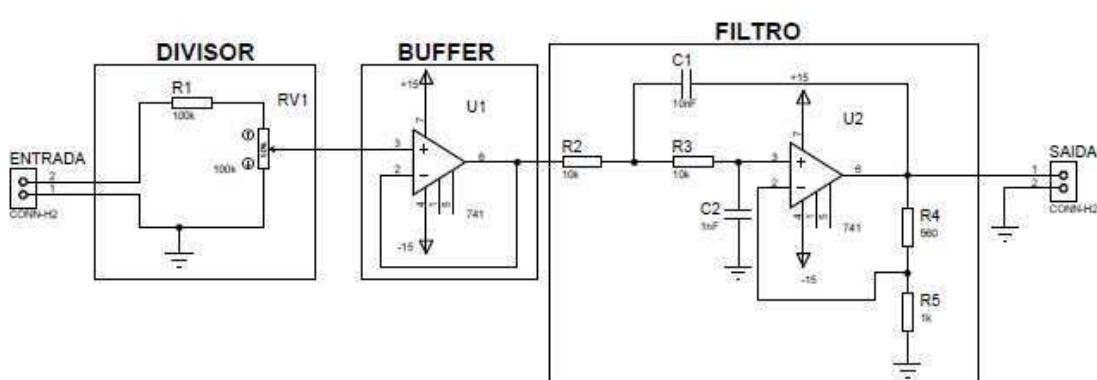


Figura 3.7 - Circuito do condicionador de sinal do sensor Hall

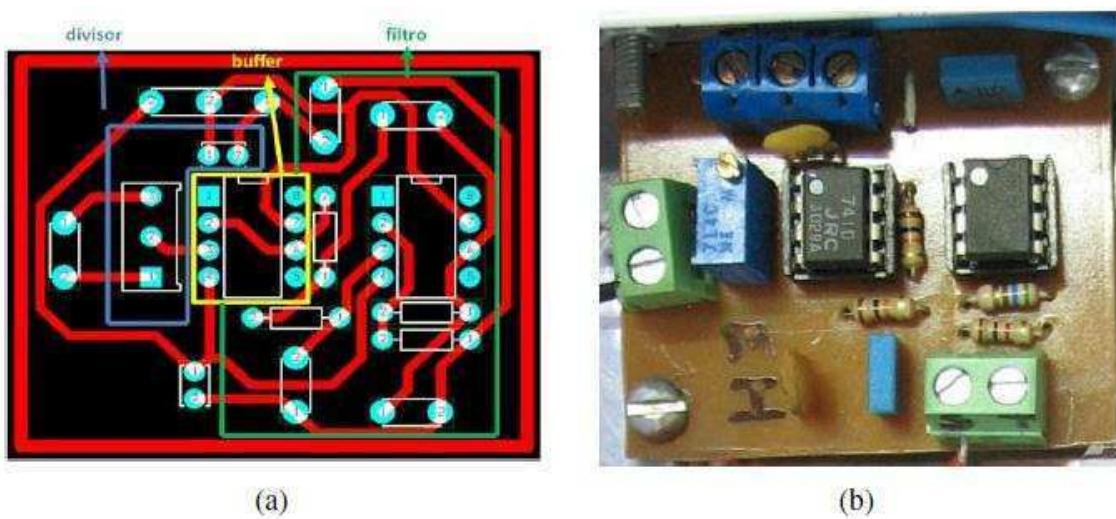


Figura 3.8 -Círcuito elétrico do condicionador de sinal do efeito Hall: (a) Projeto da placa de circuito impresso e (b) placa com os componentes instalados

3.1.4 DIVISOR DE TENSÃO (DTS)

Para possibilitar a aquisição do valor de tensão de soldagem na placa de aquisição utilizada, foi necessária a utilização de um divisor de tensão para garantir que a entrada de tensão na placa fosse de no máximo ± 10 V (faixa de medição da placa). Como a tensão máxima de saída das fontes do laboratório é em torno de 60 a 70 V (tensão em vazio), utilizou-se uma razão de divisão de aproximadamente 10:1, o que garante uma entrada máxima na placa de aproximadamente 7 V. A Figura 3.9 mostra o diagrama do circuito, enquanto a Figura 3.10 mostra o projeto da placa de circuito impresso e uma fotografia do circuito do condicionador de sinais pronto. Neste divisor de tensão, como no condicionador de sinal do sensor Hall, foi utilizado um filtro do tipo passa baixa com frequência de corte de 1000 Hz.

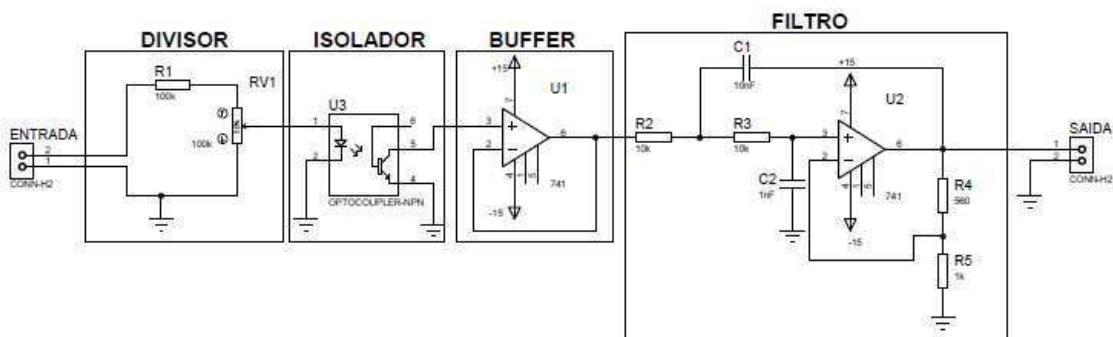


Figura 3.9 - Circuito do divisor de tensão

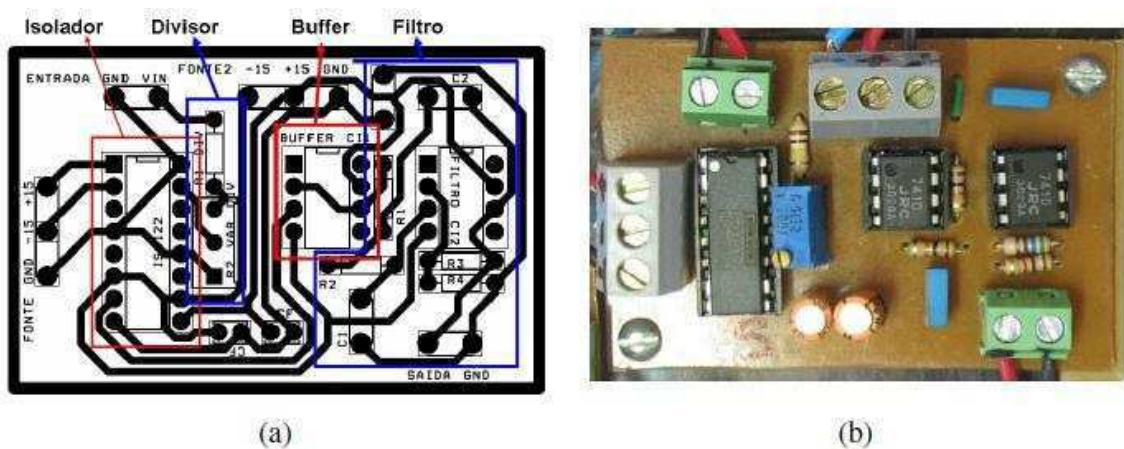


Figura 3.10 - Circuito elétrico do divisor de tensão: (a) Projeto da placa de circuito impresso e (b) placa com os componentes instalados

3.1.5 CALIBRAÇÃO DOS TRANSDUTORES/CONDICIONADORES DE SINAIS

Para calibração do divisor de tensão e do sensor Hall, foi utilizada uma fonte de soldagem e um banco de cargas para simulação de uma soldagem com objetivo de gerar os sinais estáveis de tensão e corrente utilizados para calibração. O procedimento utilizado foi impor um valor de tensão na fonte, conectada ao banco de carga, e ler com um voltímetro e um amperímetro calibrados os valores de tensão e corrente de saída da fonte (entrada de tensão no divisor de tensão e corrente no sensor Hall). Simultaneamente eram lidas as saídas de tensão do condicionador de sinais referentes aos sinais de tensão e corrente. A Figura 3.11 apresenta um esquema da montagem para calibração. A faixa de tensão utilizada para calibração foi de 5 a 60 V e para corrente de 10 a 200 A. A tensão de soldagem era medida entre o suporte do bico de contato (por meio de terminal de medição colocado por dentro da tocha) e a mesa de soldagem.

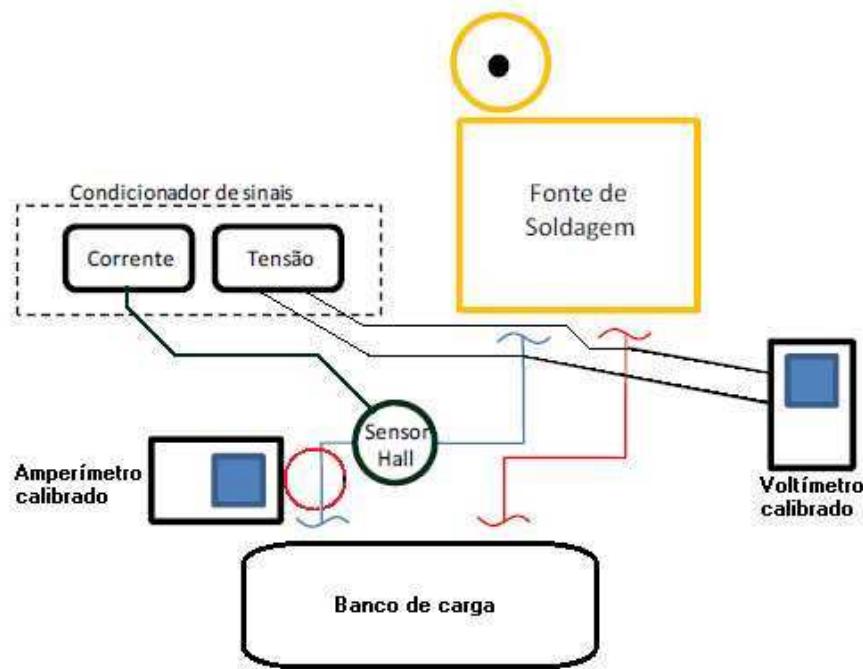


Figura 3.11 - Esquema de montagem para calibração do sistema de aquisição de sinais (a relação entre os valores de corrente e tensão obtidos nos multímetros é que gera a curva de calibração)

3.1.6 PROGRAMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Para aquisição e armazenamento dos dados de soldagem foi implementado, por integrantes do Grupo Laprosolda em linguagem LabView®, um programa que captura os dados durante a soldagem e após término da aquisição os apresenta em forma de gráficos. A tela de interface do programa com o usuário é apresentada na Figura 3.12 enquanto a

Figura 3.13 apresenta o código fonte do programa. A taxa de aquisição utilizada para os sinais elétricos foi de 5000 Hz.

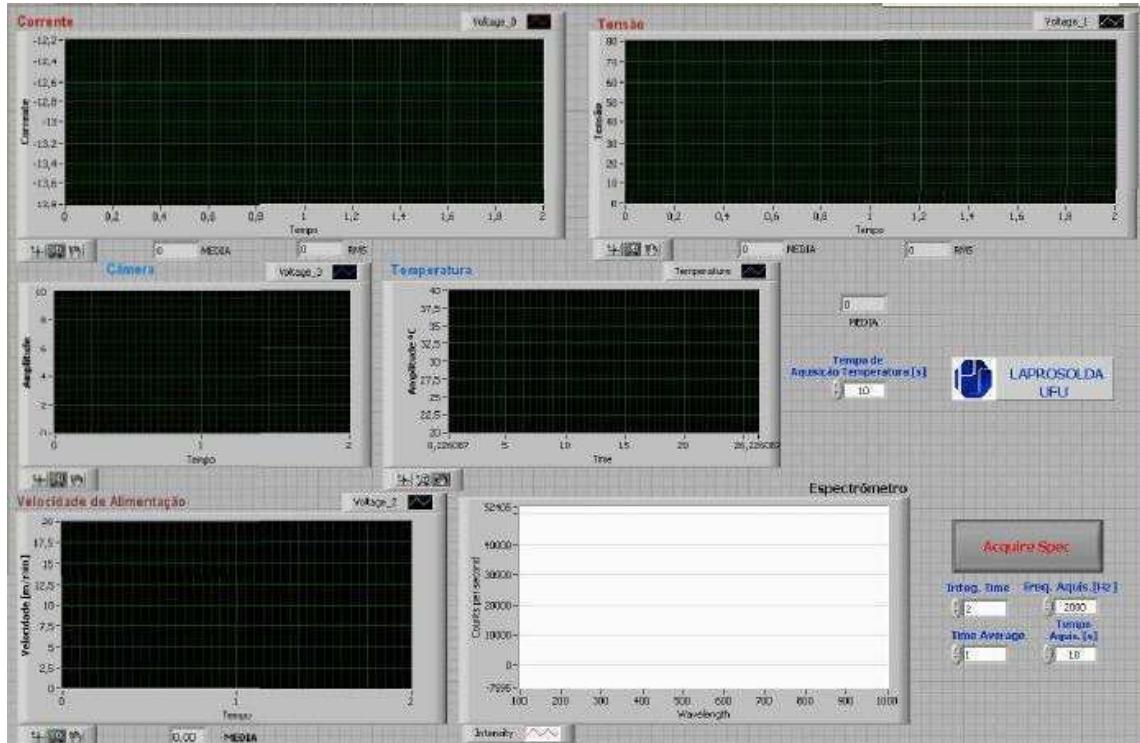


Figura 3.12 - Interface do programa com o usuário

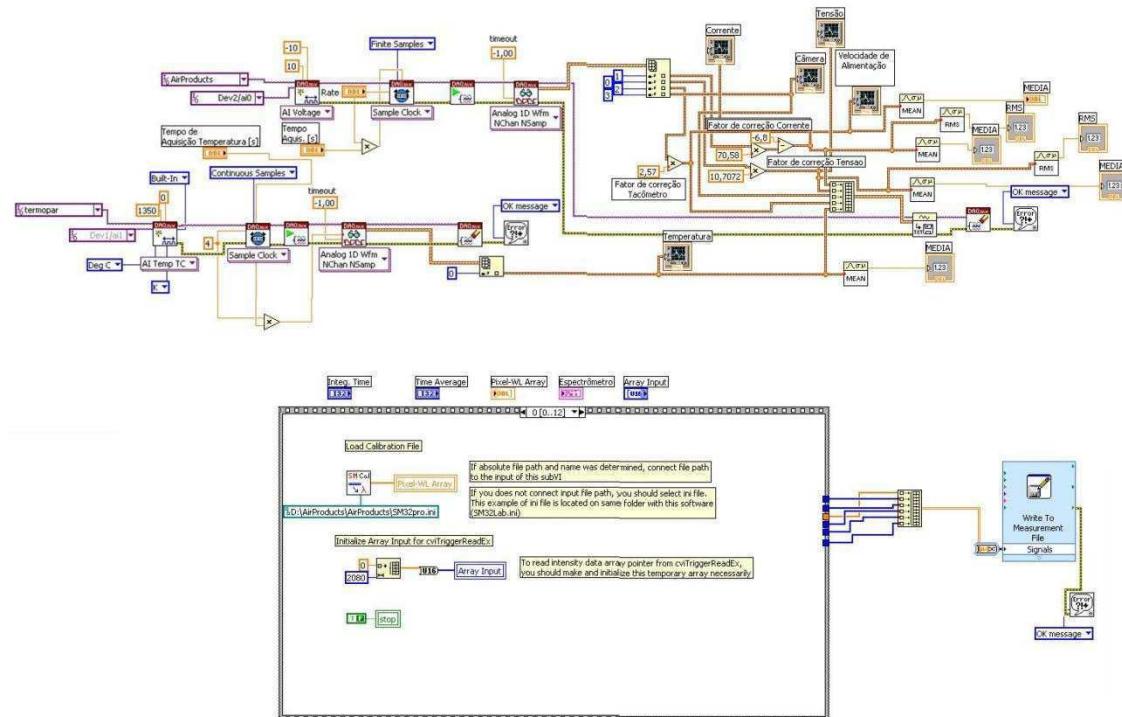


Figura 3.13 - Código fonte do programa

3.2 METODOLOGIA PARA ANÁLISE DO ARCO PELO SINAL DE TENSÃO

No desenvolvimento deste trabalho foi utilizada como técnica de análise base a análise dos sinais elétricos do arco, sendo também utilizadas as técnicas de fotografia e espectroscopia óptica para tentar justificar alguns fenômenos do comportamento do arco observados e de difícil justificação do fenômeno com apenas a análise elétrica.

Para realizar a análise elétrica, é necessário medir os sinais de corrente e tensão. Como foi utilizado o processo de soldagem TIG, e esse é um processo no qual a fonte de soldagem impõe o valor da corrente (mantendo esse valor independente do que aconteça com o arco), todos os fenômenos que venham acontecer durante o processo de soldagem, como os investigados no arco, serão avaliados pela variação da tensão. Porém, durante os ensaios, o valor da corrente também foi medido, de forma a permitir a validação dos resultados pela repetição dos ensaios.

Definido que o sinal de tensão será o sinal utilizado para realizar as análises deste trabalho, tomou-se cuidado especial para realizar a medição dessa tensão, a fim de diminuir os erros de medição e eliminar medições de quedas de tensão indesejadas.

Todos os processos de soldagem a arco possuem o circuito elétrico muito semelhante composto de fonte de energia, cabos que ligam a tocha à fonte, elemento de contato da tocha com o eletrodo, eletrodo, arco elétrico e a peça soldada. Estes diversos elementos do circuito elétrico de soldagem podem interferir na medição dos sinais de tensão caso os terminais de medição de tensão não sejam posicionados adequadamente.

De acordo com Santana (2010), um circuito elétrico para o processo MIG/MAG apresenta uma indutância (L) (proveniente da fonte de soldagem, arco elétrico e cabos), uma queda de tensão devida à resistência parasita (R_p) (correspondendo às resistências internas da fonte e de contatos não determináveis), uma queda de tensão devida à resistência entre o bico de contato e o arame (R_b), uma queda de tensão provocada pela resistência elétrica do arame-eletrodo após bico de contato, da resistência da peça e, por fim, as quedas de tensão verificadas no arco elétrico, devidas às regiões anódica (U_a) e catódica (U_c) e a da coluna do arco (L_a), como mostrado de maneira esquemática na Figura 3.14.

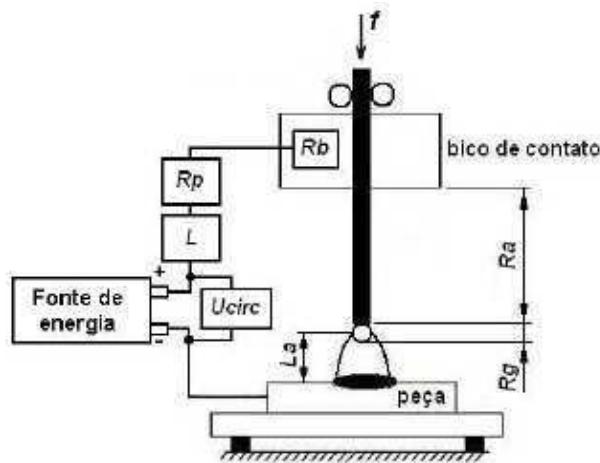


Figura 3.14 - Desenho esquemático do circuito elétrico do processo GMAW: U_{circ} = tensão no circuito elétrico do processo de soldagem, L = indutância da fonte, R_p = resistência parasita, R_b = resistência entre o bico de contato e o arame, R_a = resistência do arame, R_g = resistência da gota e L_a = queda de tensão na coluna do arco (Terasaki e Simpsom, 2006)

Analogamente ao circuito do processo MIG/MAG, o circuito do processo TIG utilizado apresenta algumas das quedas de tensões encontradas no processo MIG/MAG (porém de diferentes grandezas) como a da resistência parasita (R_p), a queda de tensão no contato da pinça com o eletrodo (equivalente à queda de tensão devido à resistência entre o bico de contato e o arame (R_b)), uma queda de tensão provocada pela resistência elétrica do eletrodo após pinça (R_a), a resistência da peça e, por fim, as quedas de tensão do arco elétrico devido às regiões anódica (U_a) e catódica (U_c) e a da coluna do arco (L_a), como mostrado de maneira esquemática na Figura 3.15.

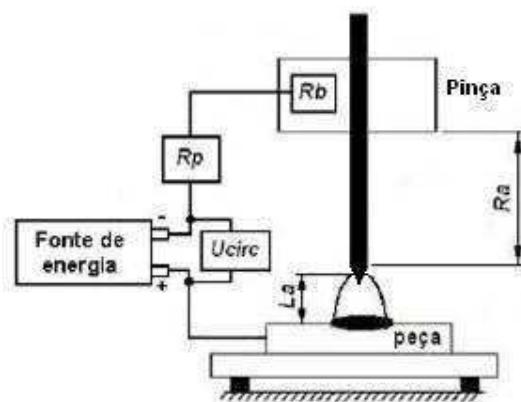


Figura 3.15 - Desenho esquemático do circuito elétrico do processo TIG: U_{circ} = tensão no circuito elétrico do processo de soldagem, R_p = resistência parasita, R_b = resistência entre a pinça e o eletrodo, R_a = resistência do eletrodo e L_a = queda de tensão na coluna do arco (adaptado de Terasaki e Simpsom (2006))

Tomando em consideração todas as quedas de tensão no circuito elétrico do processo de soldagem e que o objetivo do estudo seria o arco elétrico, faz-se necessário que a medição da tensão contenha apenas as quedas de tensão do arco elétrico, a saber, queda de tensão na região anódica, região catódica e na coluna de plasma (Costa, Ponomarev & Scotti, 2003). Entretanto, devido às elevadas temperaturas em um arco de soldagem e pelo fato de que sondas de tensão no arco podem perturbá-lo (Scotti, Ponomarev & Costa, 2006), torna necessário que a medida da queda de tensão do arco seja realizada fora do arco, porém dentro do circuito elétrico do processo.

Levando-se em consideração os problemas de temperatura e de não causar distúrbios no arco, os terminais de medição de tensão foram posicionados de forma a medir a diferença de tensão entre a pinça e a chapa de teste, excluindo das medições a queda de tensão parasita (R_p) da Figura 3.15. A Figura 3.16 mostra um desenho esquemático da medição de tensão durante os testes e a Figura 3.17 mostra o posicionamento do terminal de medição de tensão em uma tocha TIG. Pela Figura 3.16 obtém-se a medição da queda de tensão pela Equação 3.1.

$$U_m = (\text{terminal}+) - (\text{terminal}-) = R_b + R_a + L_a \quad (3.1)$$

Onde:

Um é a tensão medida no processo de soldagem;

terminal+ é o valor absoluto da tensão na pinça;

terminal- é o valor absoluto da tensão na chapa de teste;

R_b é o valor da queda de tensão na resistência da pinça com o eletrodo;

R_a é o valor da queda de tensão no eletrodo;

L_a é o valor da queda de tensão na coluna do arco.

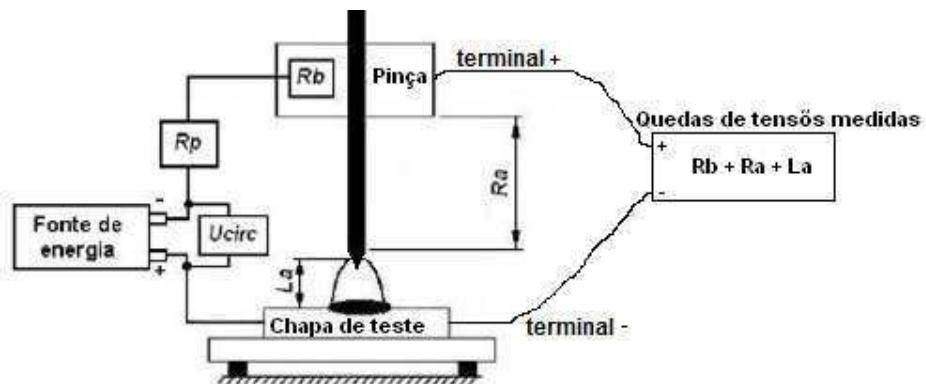


Figura 3.16 - Desenho esquemático do circuito elétrico do processo TIG e do posicionamento dos terminais de medição de tensão utilizada para medir a tensão: U_{circ} = tensão no circuito elétrico do processo de soldagem, R_p = resistência parasita, R_b = resistência entre a pinça e o eletrodo, R_a = resistência do eletrodo, terminal+ = valor da tensão medida em relação à tensão de referência, terminal- = valor de referência para a medição da tensão e L_a = queda de tensão na coluna do arco,. Adaptado de Terasaki e Simpsom (2006)

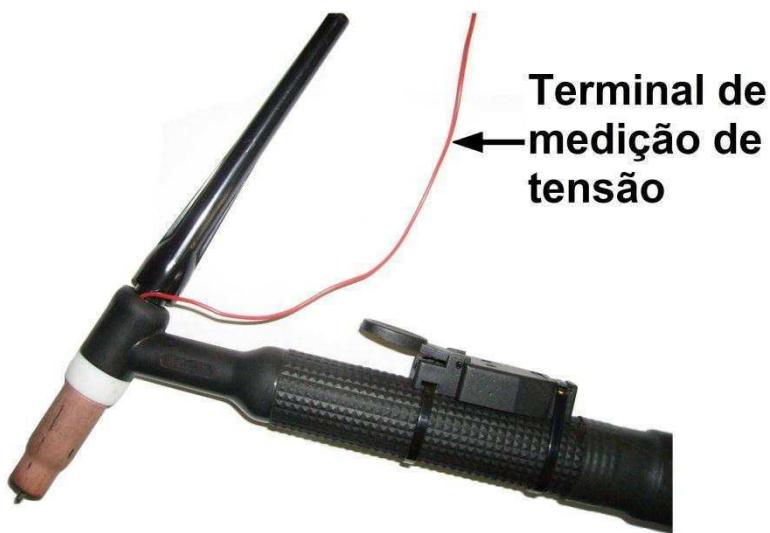


Figura 3.17 - Posicionamento do terminal de medição de tensão em uma tocha TIG

Com a montagem do terminal de medição de tensão montada como mostrada nas Figura 3.16 e Figura 3.17, obtém-se a medição, de forma conjunta, das quedas de tensão na resistência entre a pinça e o eletrodo (R_b), na resistência do eletrodo (R_a) e também a somatória das quedas de tensão ao longo do arco (objeto de estudo), tornando necessário o desenvolvimento de uma metodologia para remover as quedas de tensão indesejadas (nas resistências R_a e R_b) para o estudo.

Partindo do pressuposto que o circuito elétrico do processo TIG é composto de quedas de tensão ligadas em série (nas resistências R_a e R_b e a do arco) e conhecendo o valor das quedas de tensão total, basta subtrair desse total a soma das quedas de tensão indesejadas (nas resistências R_b e R_a) para obter a queda de tensão desejada, no caso a do arco.

Para isso foi desenvolvida uma metodologia para obter o valor dessas quedas de tensão indesejadas separadas da do arco.

3.2.1 SOMATÓRIA DAS QUEDAS DE TENSÃO DA PINÇA-ELETRODO (R_b) E DO ELETRODO (R_a)

Para obter apenas a tensão do arco (conexões anódica e catódica e ao longo do arco), teve-se inicialmente de se desenvolver uma metodologia para conhecer as tensões nas R_a e R_b , para que essas pudessem ser removidas da tensão total media durante os testes e, dessa forma, obtendo-se apenas a tensão do arco.

Para minimizar a queda de tensão da resistência da chapa, procurou-se utilizar chapas grossas, pois a resistência elétrica dos materiais é inversamente proporcional à área da seção por onde passa a corrente por ele. Assim, foram utilizadas chapas com seção transversal de 38 mm X 13 mm nos testes, podendo-se desprezar a queda de tensão na

resistência da chapa de teste. Com isso, considerou-se que a tensão medida durante os testes com o arco é a soma da queda de tensão do contato pinça-eletrodo, do eletrodo e das três partes da estrutura do arco.

Para conhecer as quedas de tensão inerentes ao processo, e não pertencentes ao arco, elaborou-se um experimento simples no qual um eletrodo de tungstênio com 2% de tório (marcação: ponta vermelha), de 2,4 mm de diâmetro, foi montado em duas tochas TIG, de forma que entre as pinças de cada tocha havia 70 mm do eletrodo, como mostrado na Figura 3.18, enquanto a Figura 3.19 apresenta o esquema elétrico do processo utilizado.



Figura 3.18 - Equipamentos e comprimento do eletrodo utilizado no experimento para medir a queda de tensão em um eletrodo de tungstênio com 2% de tório

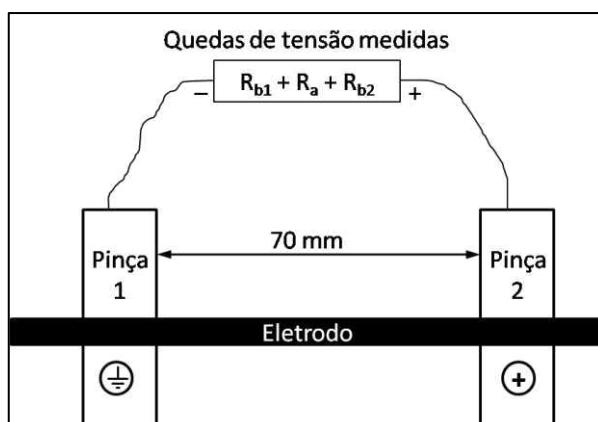


Figura 3.19 - Desenho esquemático para medir o valor da queda de tensão na resistência do eletrodo e na resistência pinça-eletrodo: Pinça 1 = pinça da tocha ligada ao terra da máquina de soldagem, Pinça 2 = pinça da tocha ligada ao positivo da máquina de soldagem

Nesta montagem, os terminais de medição de tensão foram ligados nas pinças das tochas, de forma a medir as quedas de tensão nas duas conexões pinça-eletrodo e de 70 mm de eletrodo, conforme mostrado na Figura 3.18. As medições de tensão foram feitas utilizando o sistema de condicionador e de aquisição de sinais elétricos.

A Figura 3.20 apresenta a montagem final, dos elementos da Figura 3.18, para tentar medir a queda de tensão no eletrodo utilizado nesse trabalho.

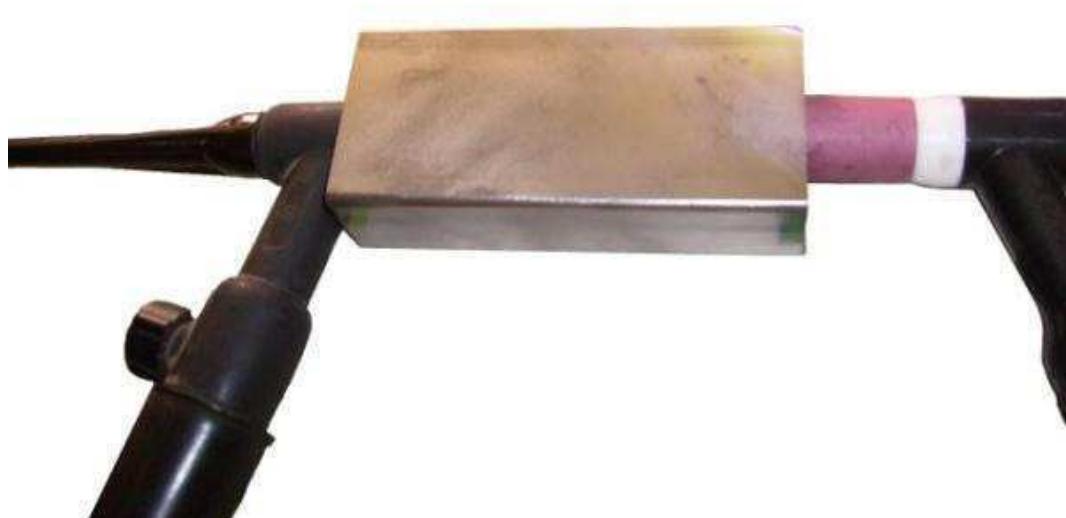


Figura 3.20 - Montagem do experimento utilizado para realizar os testes para medir a queda de tensão de um eletrodo de tungstênio com 2% de tório, o perfil envolve o eletrodo e impede a perda do gás de proteção

Foram utilizadas tochas com refrigeração à água, para proteger as pinças do calor do eletrodo, o qual foi aquecido a ponto de começar a brilhar como uma lâmpada incandescente em correntes altas, e para aproximar das condições de um processo de soldagem.

Para proteger o eletrodo de oxidação, utilizou-se o gás argônio saindo de uma das tochas e o eletrodo foi envolvido por um perfil caixão para evitar perdas do gás para a atmosfera, melhorando a proteção do eletrodo e envolvendo-o pelo gás de proteção. E como o comprimento do eletrodo utilizado foi maior do que o comprimento comum utilizado em processos de soldagem TIG a vazão utilizada também foi maior, 20 l/min, para garantir a proteção.

As quedas de tensão foram medidas para correntes de 100, 120, 140, 160, 180 e 200 A e o registro do valor das quedas de tensão foram feitas após 3 minutos do início do processo. Esse tempo foi observado durante os testes e verificou-se que após esse tempo estabilizou-se o valor da queda de tensão, provavelmente devido à estabilização da temperatura do eletrodo aquecido por efeito Joule. É necessário esperar que a temperatura

chegue ao equilíbrio antes de efetuar as medições, já que a resistividade dos materiais varia com a temperatura.

Mesmo com os cuidados tomados, ao utilizar a corrente de 200 A não foi possível medir a queda de tensão no eletrodo, pois o mesmo não suportou o calor e foi danificado durante o teste como pode se ver na Figura 3.21 e Figura 3.22. Os resultados das quedas de tensão estão demonstrados na Figura 3.23, onde é possível verificar que os valores têm um comportamento em forma de parábola.



Figura 3.21 - Primeiro teste para tentar medir a queda de tensão no eletrodo com a corrente de 200 A. O eletrodo não suportou a elevada temperatura e em pouco tempo curvou-se devido aos esforços referentes à montagem



Figura 3.22 - Segundo teste para tentar medir a queda de tensão no eletrodo com a corrente de 200 A. O eletrodo não suportou a elevada temperatura e se rompeu, antes de completar os 3 minutos esperado nos outros testes

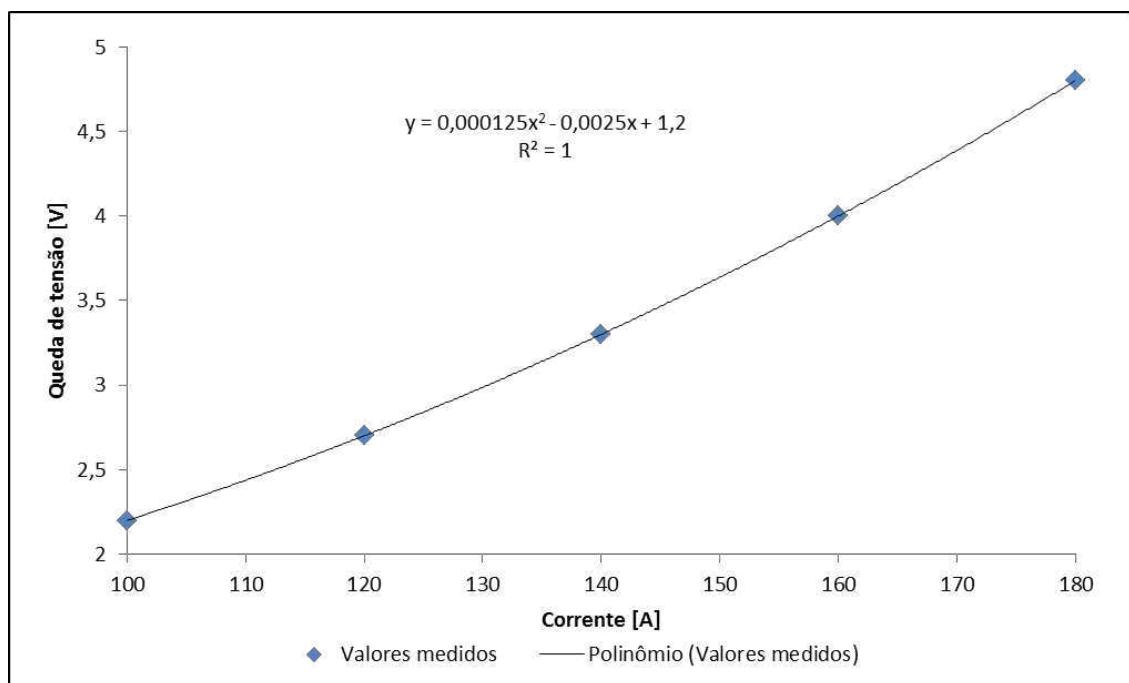


Figura 3.23 - Valores das quedas de tensão medidas no experimento e a linha de tendência dos pontos obtidos

Conhecendo os valores das quedas de tensão para um eletrodo de 70 mm foram calculados os valores de quedas de tensão para eletrodos de 15 e 20 mm, comprimentos

que foram utilizados nesse trabalho. Os cálculos foram realizados levando em consideração que a queda de tensão medida é apenas a do eletrodo de tungstênio.

Fazendo as quedas de tensão medidas proporcionais ao comprimento do eletrodo, obteve-se os resultados apresentados na Tabela 3.1. Calculou-se também a resistividade elétrica do eletrodo, usando o mesmo princípio anterior de que a queda de tensão medida é do eletrodo, e comparou-se o resultado com o valor da resistividade do tungstênio obtido em literatura on-line (The Physics Hypertextbook). Os resultados encontram-se na Tabela 3.2.

Tabela 3.1 - Medida das quedas de tensão e o valor da queda de tensão por comprimento de eletrodo e tungstênio

Corrente (A)	Queda de Tensão com 70 mm de eletrodo (V)	Tensão/mm de eletrodo (V/mm)	Queda de Tensão com 15 mm de eletrodo (V)	Queda de Tensão com 20 mm de eletrodo (V)
100	2,2	0,031428571	0,471428571	0,628571429
120	2,7	0,038571429	0,578571429	0,771428571
140	3,3	0,047142857	0,707142857	0,942857143
160	4	0,057142857	0,857142857	1,142857143
180	4,8	0,068571429	1,028571429	1,371428571
200	-	-	-	-

Tabela 3.2 - Medida das quedas de tensão e o valor da resistividade elétrica do eletrodo e tungstênio

Corrente (A)	Queda de tensão para 70 mm (V)	Resistência (Ω)	Resistência/mm (Ω/mm)	Resistividade (Ω/mm)	Resistividade na literatura (Ω/mm)
100	2,2	0,0220	0,000314286	6,95E-05	5,60E-05
120	2,7	0,0225	0,000321429	7,10E-05	5,60E-05
140	3,3	0,0236	0,000336735	7,44E-05	5,60E-05
160	4	0,0250	0,000357143	7,89E-05	5,60E-05
180	4,8	0,0267	0,000380952	8,42E-05	5,60E-05
200	-	-	-	-	-

3.2.2 DISCUSSÃO GERAL

O estudo do arco através das medições dos parâmetros elétricos (corrente e tensão) apresenta o inconveniente de não ser possível medir a tensão diretamente no arco sem perturbá-lo ou danificar o terminal de medição de tensão, sendo necessário medir também, porém indesejavelmente, a queda de tensão na resistência de contato pinça-eletrodo (R_b) e da do eletrodo (R_a). Entretanto, é possível medir essas quedas de tensão indesejadas separadas do arco, através da metodologia utilizada nesse capítulo, e, então, subtrair o valor das quedas de tensão indesejadas das medições dos testes e obter apenas a queda de tensão do arco.

A metodologia proposta para medir as quedas de tensão indesejadas é fácil de ser aplicada, e confiável o bastante, pois o valor da resistividade do eletrodo medida por esse processo aproxima-se do valor encontrado na literatura, contendo um erro que pode ser atribuído à aproximação feita ao desprezar a queda de tensão nos contatos pinça-eletrodo e a não utilização do fator de ajuste da resistividade devido à temperatura do eletrodo, como descrito por Girotto e Santos (2002).

A não utilização desse fator de correção é devido à tentativa de aproximar o valor da queda de tensão do teste com o valor de queda de tensão durante um processo de soldagem, que segundo Lancaster (1986) envolve elevadas temperaturas no eletrodo devido ao efeito Joule e ao calor do arco. Com essa metodologia também é possível simular a distribuição de temperatura do eletrodo durante o processo de soldagem, pois o meio do eletrodo é mais aquecido do que as extremidades em contato com a tocha, já que elas são refrigeradas.

O perfil parabólico das quedas de tensão da Figura 3.23 pode ser devido ao calor gerado no eletrodo pelo efeito Joule, que para esse caso é de forma quadrática, como mostrado na Equação 3.2, o que provoca um aquecimento do eletrodo também de forma quadrática, enquanto que as trocas de calor para o meio (condução e convecção) são de forma linear, como mostrado pela Equação 3.3, Equação 3.4 e Equação 3.5.

$$Q = I^2 \cdot Ra \quad (3.2)$$

$$Q_c = -K \cdot A_t (T_e - T_p) \quad (3.3)$$

$$Q_v = A_s \cdot (T_s - T_\infty) \cdot h \quad (3.4)$$

Porém, a Equação 3.4 pode ser aproximada para (INCROPERA; DEWITT, 2003):

$$Q_v = hm \cdot A_s \cdot (T_s - T_\infty) \quad (3.5)$$

Onde:

Q é o calor gerado por efeito Joule;

I é a corrente que circula pelo eletrodo;

R_a é a resistência do eletrodo;

Q_c é o calor perdido por condução do eletrodo para as pinças;

A_t é a área da seção transversal do eletrodo;

T_e é a maior temperatura do eletrodo;

T_p é a temperatura das pinças;

K é condutividade térmica do eletrodo;

Q_v é o calor perdido por convecção para a atmosfera por meio do gás de proteção;

h é o coeficiente local de convecção;

hm é o coeficiente de convecção médio;

A_s é a área da superfície do eletrodo;

T_s é a temperatura da superfície do eletrodo;

T_∞ é a temperatura do gás de proteção.

Capítulo IV

ESTUDO DA TROCA DE CALOR DO ARCO COM O MEIO AMBIENTE

Segundo Takahashi et al. (2010), a troca de calor do arco com o meio ambiente (seja ela por condução, convecção ou radiação) influência na tensão para manter o arco. Esta afirmação está de acordo com uma citação de Scotti & Ponomarev (2008), de que para uma determinada corrente, a tensão do arco é relacionada com a capacidade de troca de calor com o meio ambiente, ou seja, quanto mais calor sair do arco mais tensão é necessária para manter o arco. Ainda segundo Scotti & Ponomarev, a perda de calor do arco para o meio ambiente leva à desionização parcial da coluna do arco e isso demanda mais potência (tensão) para o arco.

Desta forma este capítulo tem a intenção de verificar a influência da perda de calor na coluna de plasma para o meio ambiente, quantificando essa influência através do sinal de tensão do arco de soldagem.

4.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A ideia básica seria fazer análises comparativas, entre uma condição na qual o arco perderia de calor para o ambiente de forma natural (doravante referenciada como condição de referência) e uma condição em que houvesse restrição de perda de calor.

Na tentativa de impedir a perda de calor do arco para o meio ambiente, propôs-se a elaboração e montagem de um sistema similar ao de um meio quase-adiabático, a partir da utilização de tijolos refratários isolantes. Neste sistema, a tocha de soldagem TIG foi posicionada no interior de um furo previamente aberto no tijolo. Neste furo, foi posicionado um bocal cerâmico TIG, preso por argamassa refratária, no qual a tocha era acoplada, como ilustra a Figura 4.1. Nesta montagem, o arco elétrico é aberto e mantido dentro deste furo, sendo o calor produzido isolado ao máximo do meio externo, como ilustrado na Figura 4.2. Na verdade, este objetivo não é conseguido por inteiro, pois haverá perdas por convecção forçada devido ao jato de plasma, já que o sistema não é, e nem poderia ser,

hermeticamente fechado. Assim, doravante, este meio será referenciado como “quase-adiabático”.



Figura 4.1 - Tijolo refratário isolante utilizado com um bocal de tocha TIG preso a ele, através de uma argamassa refratária, para formar um meio quase-adiabático para um arco TIG

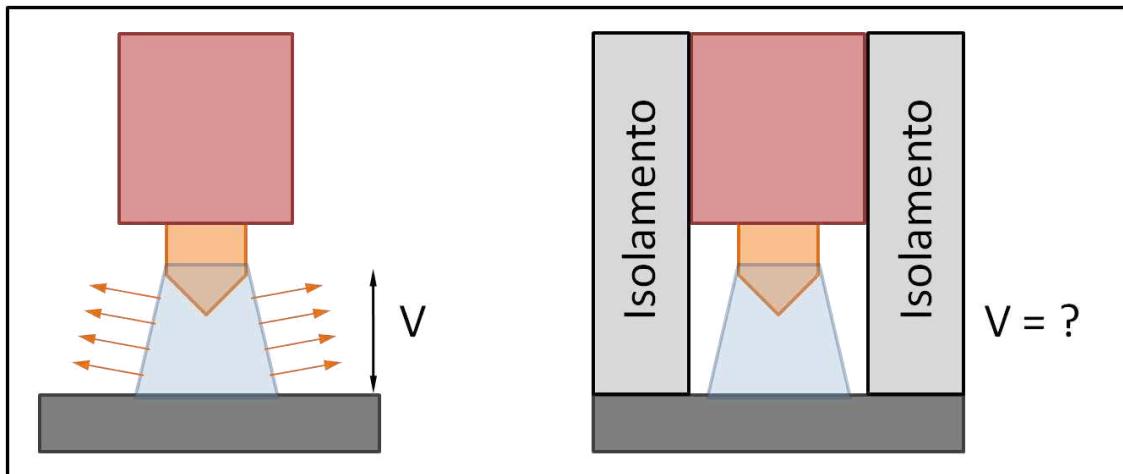


Figura 4.2 - Representação esquemática do processo de isolamento do arco: a esquerda, o arco em um ambiente aberto e o calor perdido pela coluna de plasma; a direita, o arco com o isolamento

Os testes (na condição de referência e na condição quase-adiabática) foram realizados com o processo de soldagem TIG com polaridade direta, ou seja, o eletrodo foi ligado ao polo negativo da fonte. O eletrodo utilizado foi de W contendo 2% de tório, com 2,4 mm de diâmetro. O eletrodo foi montado na tocha de forma a que o arco tivesse 10 mm de comprimento (para o comprimento do arco foi considerada a distância da ponta do eletrodo à chapa de teste). Com um arco longo (de 10 mm), tem-se uma grande área de troca de calor (toda a superfície da coluna de plasma), o que favoreceria a troca de calor com o meio ambiente. Em seu trabalho, Allum (1983) mostrou que, para um arco de 10 mm, 70% da energia é perdida por convecção. Se este dado é verdade, o procedimento proposto terá uma deficiência, pois não se conseguirá conter as perdas por convecção. Mas mesmo assim, haveria 30% de perda, das quais se espera que grande parte seja por radiação, que poderá ser evitada com esta condição de isolamento do arco (quase-adiabático). Devido às dimensões dos outros componentes (tijolo e bocal), o eletrodo teve que ter um comprimento

de 15 mm (do porta eletrodo à sua ponta), de forma que na montagem final a sua ponta ficasse a 10 mm da chapa de teste, como mostra a Figura 4.3.

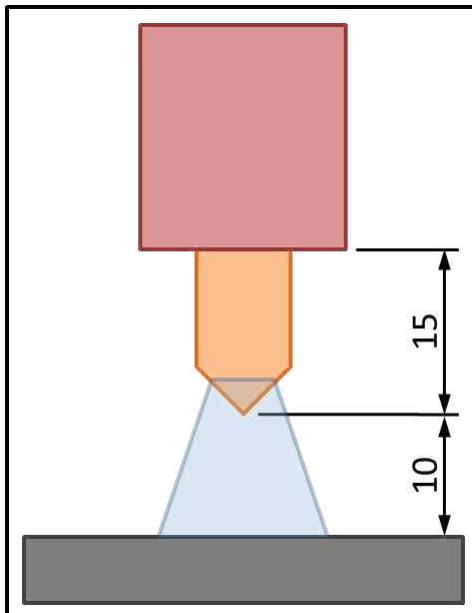


Figura 4.3 - Comprimento do eletrodo e do arco para os testes de referência e no meio quase-adiabático

Para a criação do meio quase-adiabático, o tijolo isolante foi posicionado sobre a chapa de testes e, então, a tocha (acompanhada com o eletrodo), era abaixada, de forma concêntrica ao bocal até que ambos se tocassem. Após entrar em contato com o bocal a tocha era pressionada no bocal, para garantir o contato da rosca do bocal com a rosca da tocha e garantir o contato do tijolo com a chapa de teste.

Os testes de referência foram realizados impondo os mesmos valores de corrente, comprimento do arco, tamanho do eletrodo e vazão de gás.

Durante a realização dos experimentos nesta etapa, foi utilizada a bancada apresentada na Figura 4.4. Essa bancada permite movimento nos eixos X, Y e Z, mas utilizando-se apenas o movimento do eixo Z para o posicionamento da tocha na distância correta da chapa de testes e para exercer a pressão da tocha no meio quase-adiabático. O equipamento para a monitoração e registro da corrente e tensão utilizado está descrito no Capítulo 3. Os testes do arco em meio quase-adiabático foram feitos de maneira estática, sem movimento de translação da tocha (velocidade de soldagem zero), pois na montagem do meio quase-adiabático o tijolo fica em contato com a chapa de teste, impedindo esse tipo de movimento. Para efeito de comparação, os testes de referência também foram realizados de forma estática.

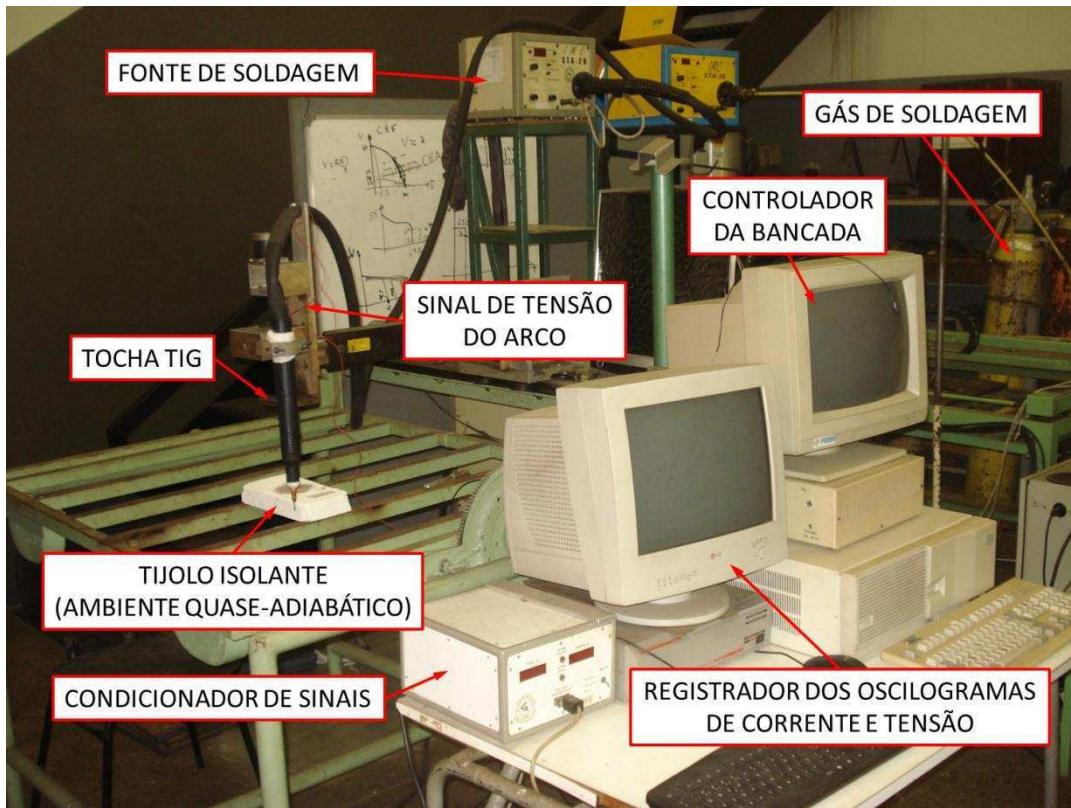


Figura 4.4 - Bancada utilizada para os experimentos com o arco em um ambiente quase-adiabático

Para o acendimento do arco, utilizou-se um eletrodo de tungstênio não energizado, com diâmetro de 1,6 mm. Como ilustra a Figura 4.5, com este eletrodo não energizado, se fazia o contato entre a ponta do eletrodo energizado à chapa até abrir o arco, quando, então, era removido para que o arco pudesse ser mantido. De forma a possibilitar que o eletrodo de contato pudesse entrar no meio quase-adiabático para fazer contato com o eletrodo da tocha, foram feitos furos na chapa de teste por onde o eletrodo de contato pudesse entrar. O eletrodo era empurrado manualmente pelo furo da chapa até tocar o eletrodo da tocha e fechando o contato elétrico. Enquanto o eletrodo de contato se afastava do eletrodo da tocha, o arco era mantido entre eles, até que o eletrodo de contato ficasse abaixo do nível da chapa de teste.

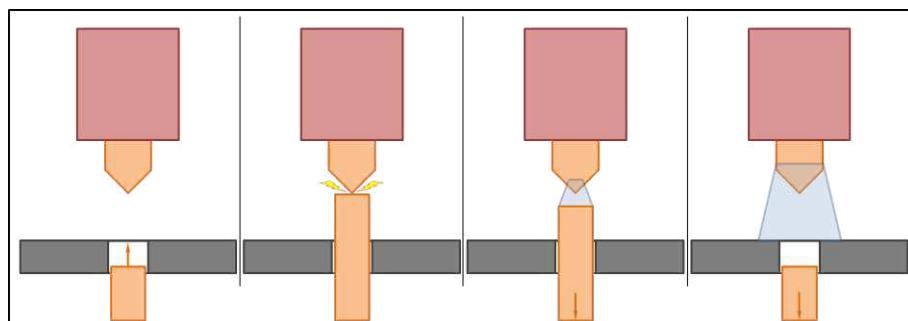


Figura 4.5 - Esquema de abertura do arco quando o mesmo deverá se estabelecido dentro de um meio quase-adiabático

Os furos da chapa de teste eram de pequeno diâmetro, de 1,8 mm, para que não pudessem interferir no meio quase-adiabático, mas de tal forma a permitir a entrada do eletrodo de contato (de 1,6 mm). Após poucos segundos do começo do teste a poça de fusão fechava o furo, fazendo com que a interferência do furo pudesse ser desprezada (rápido fechamento dos furos e longo tempo de arco aberto).

Ao se soldar com corrente contínua constante, havia um aquecimento progressivo do meio quase-adiabático. Assim, para verificar o comportamento do arco quanto à perda de calor, os testes foram realizados com corrente pulsada, com 35 A na base e 100 A no pulso. Foram testados três períodos de pulsação, 0,1 s, 1 s e 6 s, sempre mantendo uma razão de 50% para a duração do pulso. A ideia era de que durante a fase da corrente de pulso o meio se aquecesse de forma mais intensa. Já durante a fase da corrente de base se avaliaria o efeito da perda de energia do arco na forma de calor, com o isolamento mantendo a temperatura imposta pela corrente de pulso. Os diferentes tempos de pulsação são utilizados para variar a temperatura do meio quase-adiabático, pois com um período maior para a corrente de pico (100 A) mais calor está sendo gerado pelo arco, o que leva a uma maior temperatura, que poderia influenciar no comportamento do arco quando se mudasse para a corrente de base (35 A). Para garantir o total aquecimento do ambiente isolado, os testes, tanto os de referência quanto os do meio quase-adiabático, tiveram a duração de 90 s, sendo a análise dos dados feita nos 30 s finais.

4.2 RESULTADOS

A Figura 4.6 mostra o oscilograma das quedas de tensão medidas quando o arco estava no meio quase-adiabático (linha preta) e no meio de referência (linha vermelha), para um período 6 s de pulsação.

A tensão do arco para um meio quase-adiabático é ligeiramente menor do que a do arco aberto ao meio ambiente (de referência). Para melhor quantificar essa diferença, a Figura 4.7 mostra a média das quedas de tensão nos cinco intervalos da Figura 4.6 em que a corrente é de pulso, ou seja, 100 A (de 3 a 6 s, 9 a 12 s, 15 a 18 s, 21 a 24 s e de 27 a 30 s). A Figura 4.8 apresenta a média das quedas de tensão nos cinco intervalos da Figura 4.6 em que a corrente é de base, ou seja, 35 A (de 0 a 3 s, 6 a 9 s, 12 a 15 s, 18 a 21 s e de 24 a 27 s).

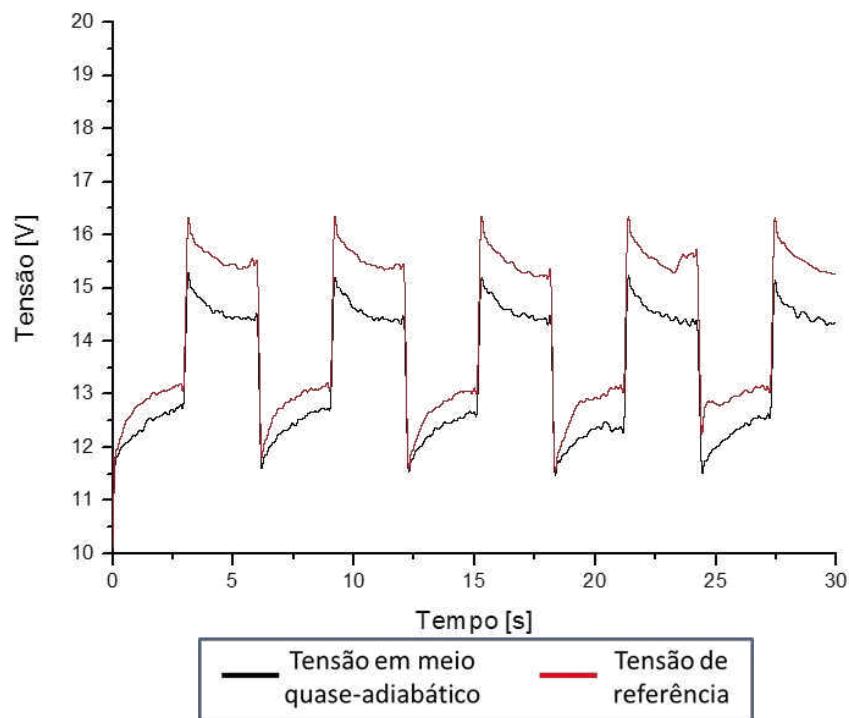


Figura 4.6 - Oscilograma com o comportamento da tensão para um processo TIG pulsado com a corrente em forma de onda quadrada variando de 35 a 100 A, para um período de onda de 6 s (os valores de tensão do arco para o meio quase-adiabático são ligeiramente menores aos valores de tensão de referência)

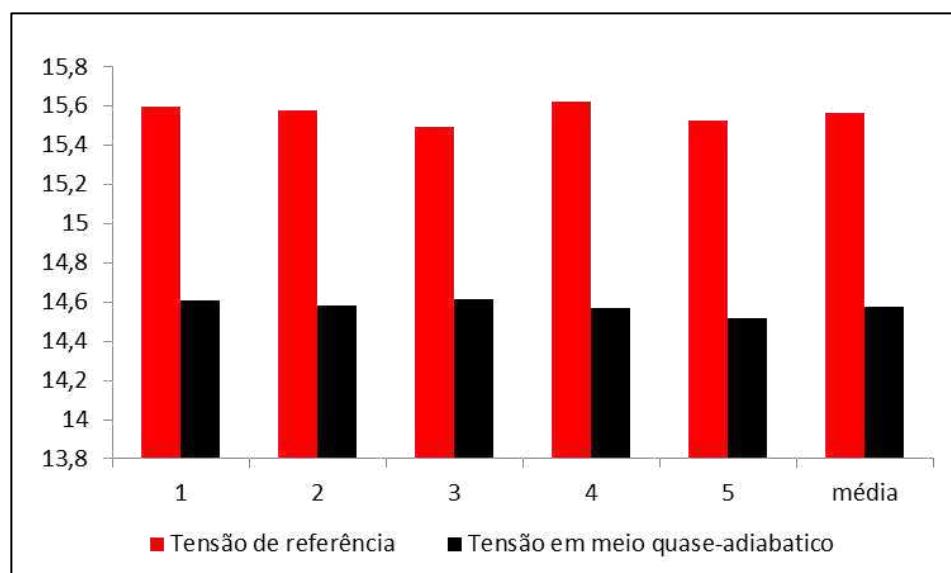


Figura 4.7 - Valores das tensões médias nos intervalos da Figura 4.6 em que agia a corrente de pulso (100 A) para um período de 6 s, o último conjunto de barras representa a média de todos os intervalos

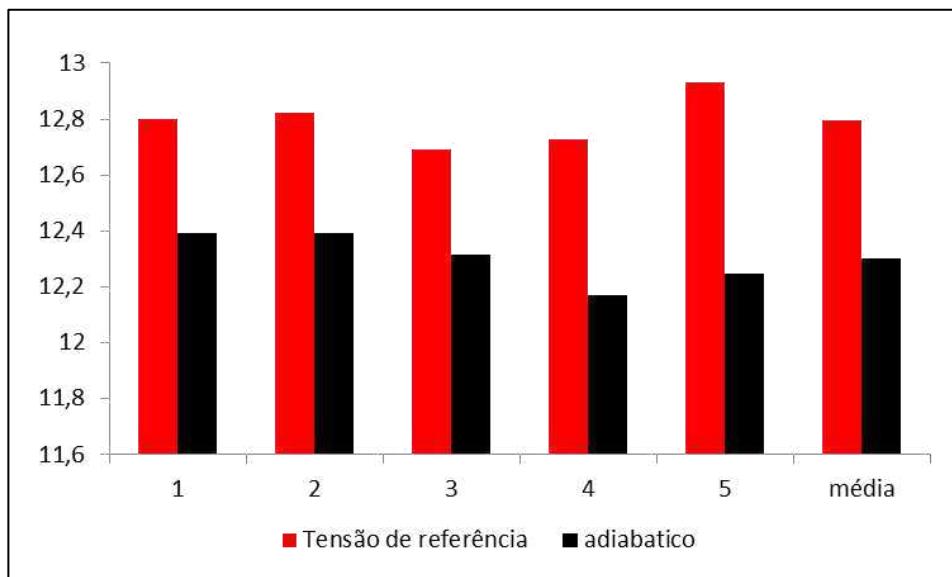


Figura 4.8 - Valores das tensões médias nos intervalos da Figura 4.6 em que agia a corrente de base (35 A) para um período de 6 s, o último conjunto de barras representa a média de todos os intervalos

Para um período menor de pulsação (maior frequência), de 1 s de pulsação, obteve-se o oscilograma da Figura 4.9, que apresenta as quedas de tensão medidas quando arco estava no meio quase-adiabático (linha preta) e no meio de referência (linha vermelha).

Pode-se observar que para essa situação a tensão do arco em um meio quase-adiabático também é ligeiramente menor do que a tensão em um meio aberto (de referência). Similarmente à condição de 6 s de período, para uma melhor quantificação dessa diferença, a Figura 4.10 mostra a média das quedas de tensão nos cinco intervalos da Figura 4.9 nos quais a corrente é de 100 A no pulso (de 0 a 0,5 s, 1 a 1,5 s, 2 a 2,5 s, 3 a 3,5 s e de 4 a 4,5 s) e a Figura 4.11 apresenta a média das quedas de tensão nos cinco intervalos da Figura 4.9 nos quais a corrente é de 35 A na base (de 0,5 a 1 s, 1,5 a 2 s, 2,5 a 3 s, 3,5 a 4 s e de 4,5 a 5 s).

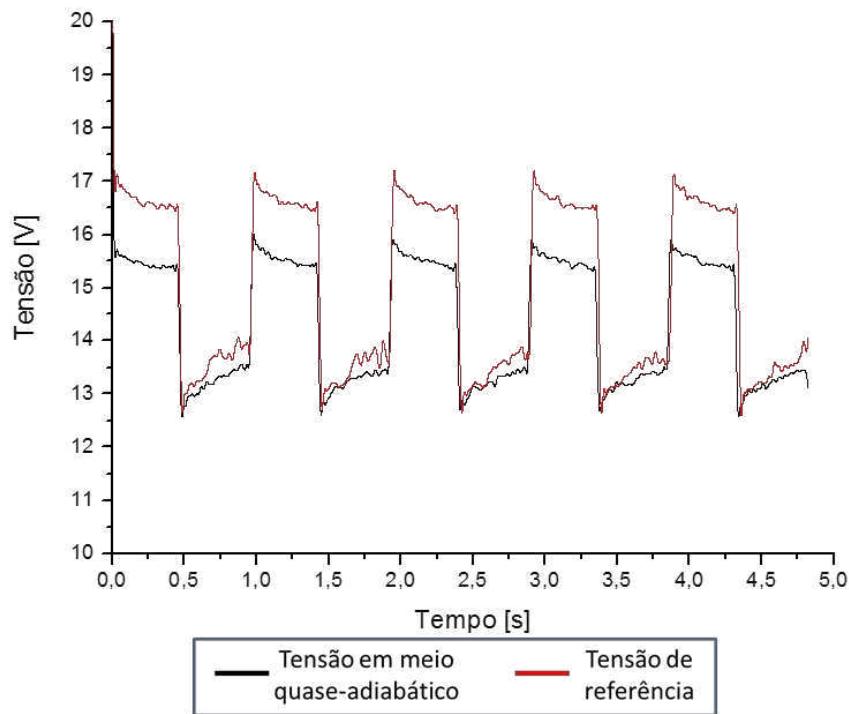


Figura 4.9 - Forma de onda da tensão para um processo TIG pulsado com a corrente em forma de onda quadrada variando de 35 a 100 A. A pulsação utilizada tem um período de onda de 1 s (os valores de tensão do arco para o meio quase-adiabático são ligeiramente menores aos valores de tensão de referência)

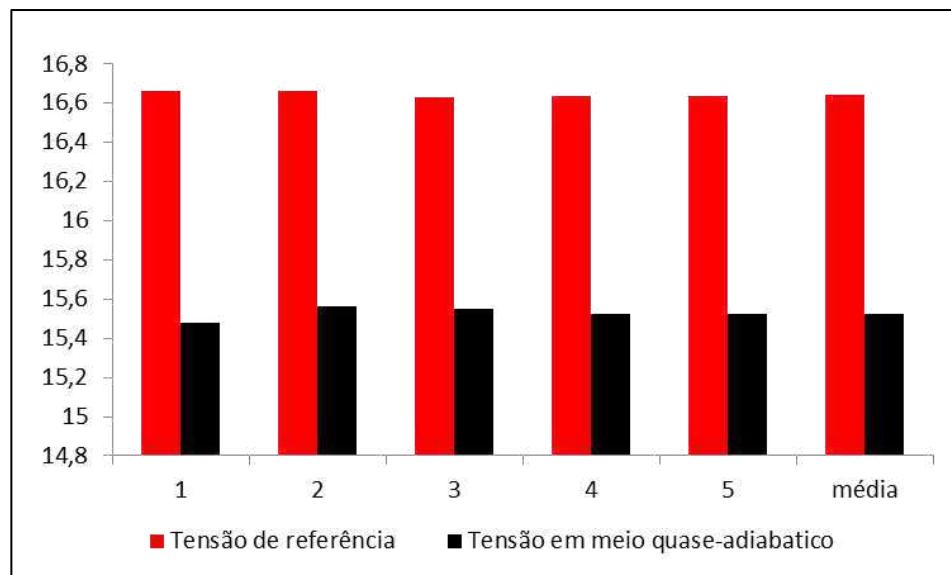


Figura 4.10 - Valores das tensões médias nos intervalos da Figura 4.9 durante a corrente de pulso (100 A), o último conjunto de barras representa a média de todos os intervalos

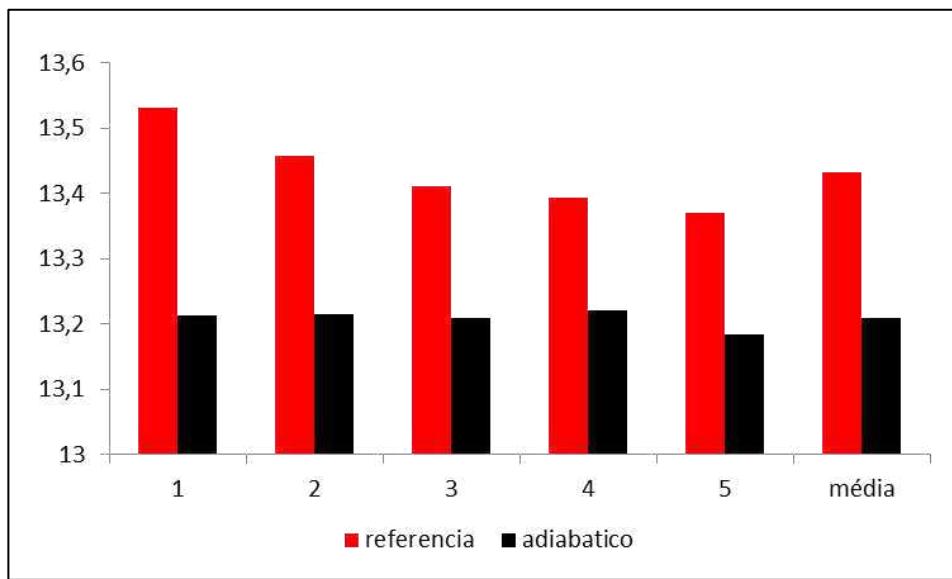


Figura 4.11 - Valores das tensões médias nos intervalos da Figura 4.9 durante a corrente de base (35 A), o último conjunto de barras representa a média de todos os intervalos

O oscilograma da queda de tensão dos testes de pulsação com o período de 0,1s (maior frequência de pulsação ainda) é apresentado na Figura 4.12. Para esta condição de alta frequência de pulsação, o equipamento de soldagem não conseguiu manter uma razão de 50% do ciclo, sendo que o tempo de corrente de 100 A ficou menor do que o de 35 A. Entretanto, ainda é possível verificar a mesma tendência que ocorreu nos casos precedentes, ou seja, a queda de tensão do arco no meio quase-adiabático (linha preta) é menor do que a queda de tensão no meio de referência (linha vermelha), mesmo que menos pronunciadas as diferenças. Desta forma, estes dados não serão usados em análise quantitativa, apenas qualitativa.

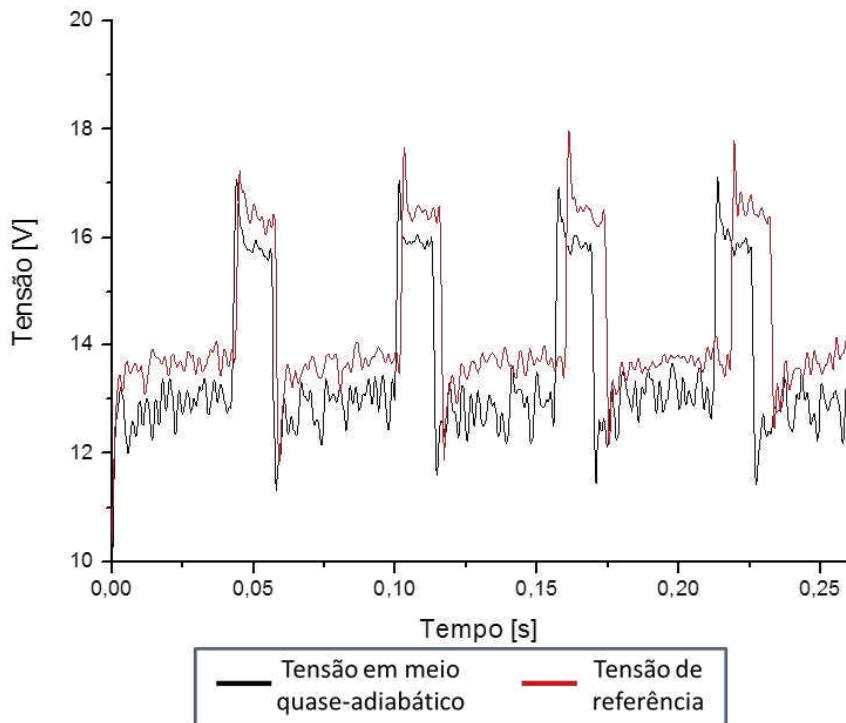


Figura 4.12 - Forma de onda da tensão para um processo TIG pulsado com a corrente em forma de onda quadrada, variando de 35 a 100 A. A pulsação utilizada tem um período de onda de 0,1 s (os valores de tensão do arco para o meio quase-adiabático são ligeiramente menores aos valores de tensão de referência)

4.3 DISCUSSÃO GERAL

Durante descrição da metodologia utilizada para verificar a influência da perda de calor do arco, foi dito que a corrente de 100 A deveria ter o papel de aquecer o meio quase-adiabático de forma a encontrar alterações significativas na queda de tensão do arco quando o mesmo estivesse com 35 A. Entretanto, é possível observar que a diferença na tensão do arco foi mais significativa quando passava por ele uma corrente de 100 A, como pode ser observado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Indicação dos valores médio da queda de tensão dos testes e a diferença do valor medido quando o arco estava no meio de referência e no meio quase-adiabático

Corrente e período de pulsação	Média das quedas de tensão no arco de referência [V]	Média das quedas de tensão no arco em meio quase-adiabático [V]	Diferença entre as quedas de tensão (referência – quase-adiabático) [V]
100 A e período de 6s	15,6	14,6	1,0
100 A e período de 1s	16,6	15,5	1,1
35 A e período de 6s	12,8	12,3	0,5
35 A e período de 1s	13,4	13,2	0,2

Um fato que pode confirmar a aceitabilidade nos resultados é a relação entre valores da literatura (ALLUM, 1983) e os valores obtidos para as queda de tensão do arco aberto ao ambiente (meio de referência).

Outro fato que contribui para a confiança nos resultados está relacionado com a sensibilidade do ensaio em perceberem a progressiva queda do valor de tensão, dentro dos períodos de pulso, e o aumento progressivo da tensão nos períodos de base. A explicação para tal baseia-se na teoria de emissão de elétrons pelo processo termoiônico. Neste modo de emissão quanto mais quente estiver o eletrodo mais fácil é para ele emitir os elétrons. Desta forma, no momento em que a corrente passa do valor de base (35 A) para o de pico (100 A) o eletrodo não está aquecido o suficiente para emitir, com facilidade, a quantidade de elétrons correspondente à nova corrente e isso força o sistema a aumentar a potência (observada pelo aumento da tensão). Quando se mantém a corrente de pico, o eletrodo começa a aquecer gradativamente (devido ao efeito Joule e ao calor do arco), facilitando a emissão dos elétrons e, com isso, a tensão diminui acompanhando o aumento na temperatura. O inverso ocorre quando a corrente passa do valor de pico (100 A) para o valor de base (35 A), pois no momento da mudança o eletrodo está aquecido devido a corrente de pulso, o que torna mais fácil a emissão da corrente de base, necessitando de menos potência (tensão) para emitir os 35 A. Entretanto, o aquecimento do eletrodo quando a corrente é de base não consegue manter a temperatura que o eletrodo possui no instante da troca das correntes, sendo resfriado pela tocha. Isso leva ao aumento da potência, e consequentemente da tensão, para emitir a corrente de base.

Voltando à diferença observada entre o valor da tensão de arco aberto (de referência) e de arco no meio quase-adiabático é possível confirmar que a intensidade de troca de calor

do arco elétrico com o meio ambiente influí nas características dele, sendo que na condição quase-adiabática a tensão de arco é menor, demandando menos energia para manter o arco. Isso pode ser explicado pela menor taxa de perda de energia do arco na forma de calor, o que leva à menor desionização do plasma e, consequentemente, à menor tensão de arco.

Capítulo V

ESTUDO DOS ARCOS EM PROCESSO DE ARCOS HÍBRIDOS CONCÊNTRICOS

Nesta etapa do trabalho, tentou-se inicialmente continuar a pesquisa sobre a troca de calor do arco para o meio ambiente, diminuindo ainda mais a troca de calor. No caso, procurou-se utilizar outro arco elétrico como de revestimento, criando, assim, um arco híbrido como, ocorre no processo Plasma-MIG.

Como ambos os arcos possuem suas temperaturas (e quantidade de calor) com aproximadamente a mesma grandeza, o fluxo de calor do arco interno para o externo deverá ser o mínimo. Então, a fonte utilizada para o arco interno deverá fornecer o mínimo de potência para que ocorra a condução de corrente, já que não haveria perda de calor para o meio e, com isso, não haveria desionização. Entretanto, devido ao comportamento coletivo que o plasma apresenta (Chen, 1985), não foi possível avaliar a influência da troca de calor e sim a influência que um arco exerce sobre o outro.

Devido à evolução dos processos de soldagem, têm surgido sistemas que aproveitam as vantagens de dois modos de soldagem diferentes ao fazer a união deles. Um dos mais promissores e em estudo no Laprosolda é o processo Plasma-MIG, no qual um processo MIG/MAG ocorre envolvido por outro arco (plasma). Segundo Resende (2009), na última década o processo Plasma-MIG tem mostrado ser uma alternativa viável para a indústria, tanto para operações de soldagem, quanto para revestimentos. Esse novo processo tem sido objeto de estudo em diversos institutos de pesquisas pelo mundo, com destaque aos institutos alemães SLV, IFS e ISAF (OLIVEIRA, 2006; REIS; SCOTTI, 2007).

De acordo com Resende (2009), apesar do processo Plasma-MIG apresentar diversas vantagens e potencialidades, ainda não se tem notícias da sua utilização em nível industrial no Brasil. Segundo o mesmo autor, do ponto de vista de desenvolvimento nacional, o grupo Labsolda da UFSC foi o pioneiro a explorar este processo. Em 2008, o grupo Laprosolda da UFU iniciou pesquisas em soldagem Plasma-MIG, no sentido de contribuir para o seu desenvolvimento. Mas pouco ainda se tem sobre os fundamentos deste processo.

Desta forma, esse capítulo tem a intenção de verificar a influência mútua entre dois arcos concêntricos, como o do processo Plasma-MIG, medindo essa influência através do sinal de tensão do arco de soldagem. O objetivo é fornecer informações dos fundamentos desta abordagem para o desenvolvimento futuro dessa tecnologia.

5.1 EQUIPAMENTOS

Para uma melhor avaliação da interação entre dois arcos híbridos concêntricos, foi feita uma adaptação do bico de contato MIG/MAG de uma tocha Plasma-MIG, de tal forma a acomodar um eletrodo de tungstênio, com 2,4 mm de diâmetro. Dessa forma, torna-se possível obter dois arcos estáveis (arco TIG e arco Plasma) em um processo sem transferência metálica (evitando a interferência na estabilidade do processo).

5.1.1 BANCADA EXPERIMENTAL

A bancada experimental utilizada é a mesma dedicada ao processo Plasma-MIG que se encontra no Laprosolda. Ela inclui fontes multiprocessos com capacidade para soldagem a Plasma e TIG e uma tocha especial para o processo Plasma-MIG. Constituem ainda os equipamentos do sistema de aquisição dos sinais elétricos descritos no Capítulo 3.

A Figura 5.1 apresenta uma visão geral da bancada experimental, com destaque especial para a tocha Plasma-MIG e identificação dos principais equipamentos e acessórios. Na sequência da figura, são listados os equipamentos por meio dos correspondentes números.

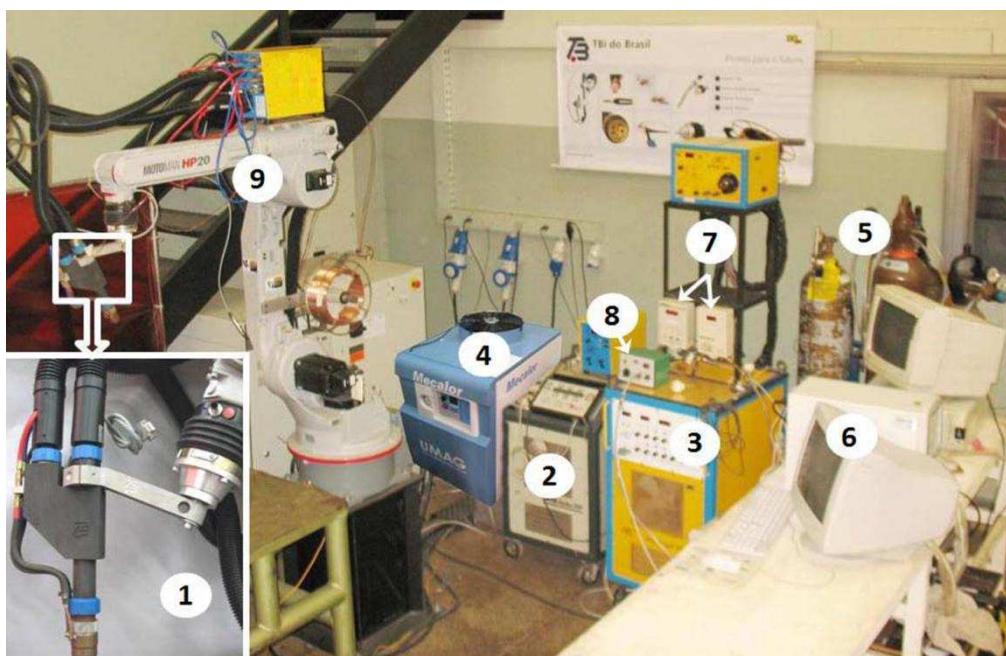


Figura 5.1 -Fotografia da bancada experimental utilizada

1. Tocha Plasma-MIG que foi modificada para o experimento;
2. Fonte TIG;
3. Fonte Plasma;
4. Unidade de água gelada;
5. Gases para o processo;
6. Sistema de aquisição de sinais elétricos;
7. Medidores de vazão para os gases Plasma e MIG/MAG;
8. Acionador de gás manual;
9. Robô para manipular a tocha.

5.1.2 TOCHA PLASMA-MIG

Neste trabalho, foi utilizada uma tocha especial que incorpora os processos Plasma e MIG/MAG, de fabricação da empresa TBi. Esta tocha pesa 1700 gramas e mede nas suas dimensões maiores 294 mm (comprimento) e 112 mm (largura). Neste modelo de tocha, o eletrodo responsável pela parte Plasma é de cobre e possui formato anular. Os elementos principais que constituem a tocha incluem o bico de contato MIG/MAG, o eletrodo anular de cobre, bocal constrictor Plasma, bocal de proteção, que estão mostrados de forma esquemática na Figura 5.2, com as devidas proporções respeitadas.

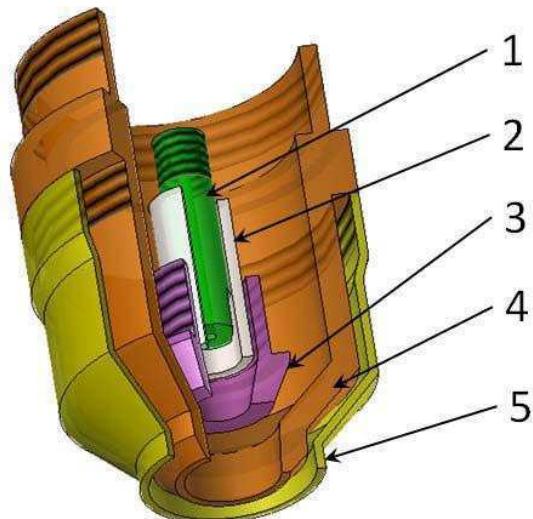


Figura 5.2 - Vista esquemática dos principais elementos da tocha Plasma-MIG. 1 – Bico de contato MIG/MAG; 2 – Isolamento cerâmico; 3 – Eletrodo Plasma; 4 – Bocal constrictor Plasma; 5 – Bocal Externo (RESENDE 2009)

Na Figura 5.3 é apresentada a tocha Plasma-MIG em sua concepção comercial utilizada para os ensaios, com destaque aos elementos principais mostrados de forma “explodida”.

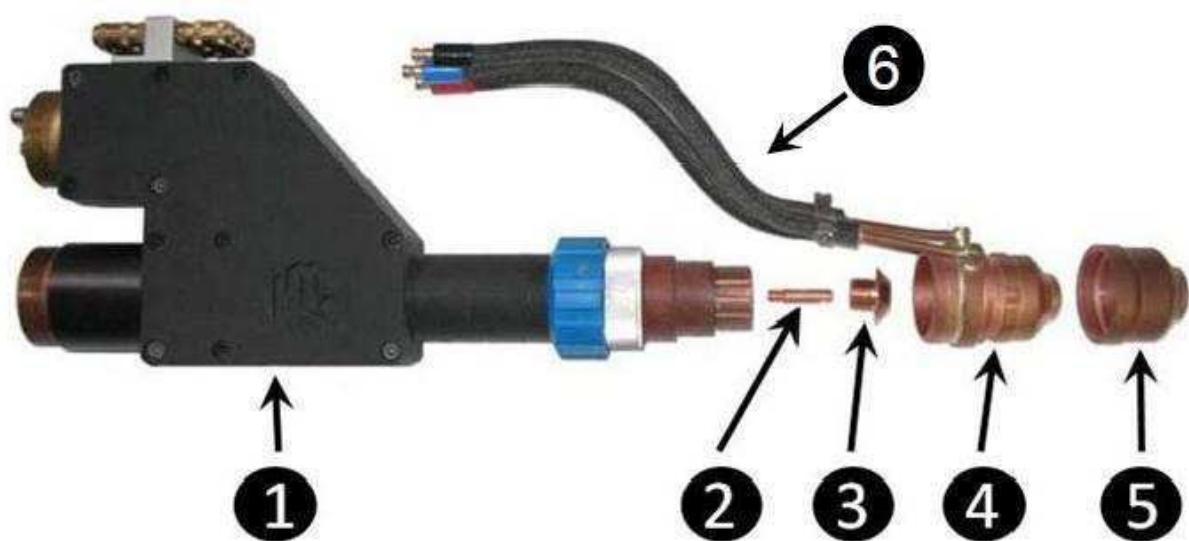


Figura 5.3 - Exemplo de uma tocha comercial para o processo Plasma-MIG de fabricação da empresa TBi.
 1 - Corpo da tocha; 2 – Bico de contato MIG/MAG; 3 - Eletrodo Plasma; 4 - Bocal constritor; 5 - Bocal externo; 6 - Mangueiras de refrigeração por água e para passagem da proteção gasosa externa.
 (RESENDE 2009)

5.1.3 ADAPTAÇÃO DA TOCHA PARA O EXPERIMENTO

De forma a criar dois arcos concêntricos em um processo sem transferência metálica foi feita uma adaptação do bico de contato MIG/MAG de forma que ele pudesse acomodar eletrodos TIG de 2,4 mm de diâmetro. Para a adaptação alargou-se o furo de 1,2 mm do bico de contato da parte MIG da tocha com uma broca de 2,5 mm, de forma a garantir que o eletrodo TIG permanecesse em contato e, ao mesmo tempo, fosse possível ajustar facilmente o comprimento do eletrodo TIG. Utilizou-se parafusos allen sem cabeça como elemento de fixação do eletrodo no bico de contato, devido a pouco espaço dentro da tocha. A Figura 5.4 mostra o bico de contato MIG/MAG adaptado e com o eletrodo TIG, enquanto a Figura 5.5 mostra um esboço da montagem esquemática do processo, mostrando a montagem dos eletrodos e os arcos híbridos.

Parafusos allen utilizados para a fixação do eletrodo

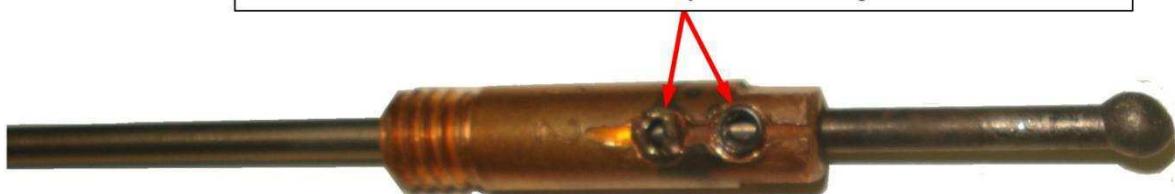


Figura 5.4 - Bico de contato MIG/MAG adaptado para o experimento e o eletrodo TIG utilizado (a ponta foi arredondada por ser W puro e os ensaios serem realizados com CC com o eletrodo no polo positivo)

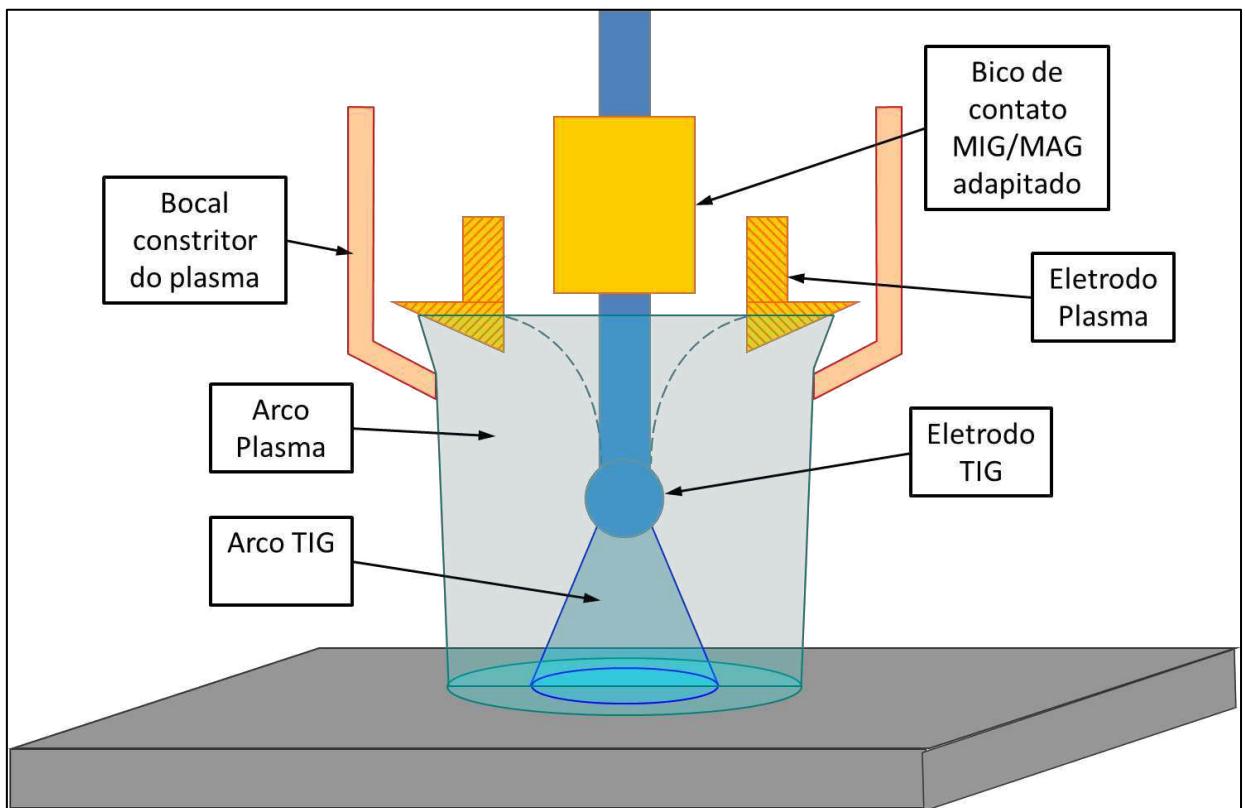


Figura 5.5 - Montagem experimental para o estudo dos arcos híbridos(a ponta arredondada do eletrodo devido a ser W puro em CC+)

5.1.4 FONTES DE SOLDAGEM PARA EXPERIMENTO

Com o intuito de criar dois arcos independentes, foi necessário a utilização de duas fontes diferentes. Para a parte Plasma do processo, foi utilizada uma fonte eletrônica de soldagem multiprocessos (chaveada no secundário, comando digital), operando com característica estática do tipo corrente constante. Para a parte TIG do processo, foi utilizada outra fonte eletrônica de soldagem, também chaveada no secundário, comando digital e também operando com característica estática do tipo corrente constante. Tentou-se inicialmente se trabalhar com o TIG no modo pulsado.

Um fato importante a ser observado é a sequência de acendimento dos arcos. Foi verificado que o arco TIG deve ser iniciado antes do arco Plasma, pois ao iniciar o arco Plasma antes que o arco TIG a fonte do processo TIG não funciona como programado. Segundo o fabricante do equipamento da fonte TIG, isto acontece devido à programação do equipamento. Para que a fonte possa operar corretamente no modo TIG, ela eleva a tensão até o seu valor em vazio (aproximadamente 70 V). Entretanto, como o eletrodo TIG já está envolvido pelo arco do processo Plasma (meio condutor), a corrente começa a fluir da fonte TIG antes da tensão chegar ao seu valor a vazio (eletrodo funciona como uma sonda de

tensão), impedindo que a fonte chegue à condição inicial em sua programação. Com isso, o processo TIG não funciona como especificado para os ensaios (modo TIG pulsado).

O problema mencionado pode ser explicado pela observação da Figura 5.6, onde é possível verificar que a fonte do processo Plasma foi acionada antes que a fonte TIG, pois o oscilograma de corrente (Figura 5.6) mostra que ao iniciar o processo TIG, por volta de 13 s após o início dos registros dos sinais, já havia a corrente do Plasma. Também é possível verificar que não ocorrem pulsações de corrente TIG, como foi configurado na máquina. Além disso, a corrente se mantém a um valor menor do que o especificado para o valor de base e o de pico.

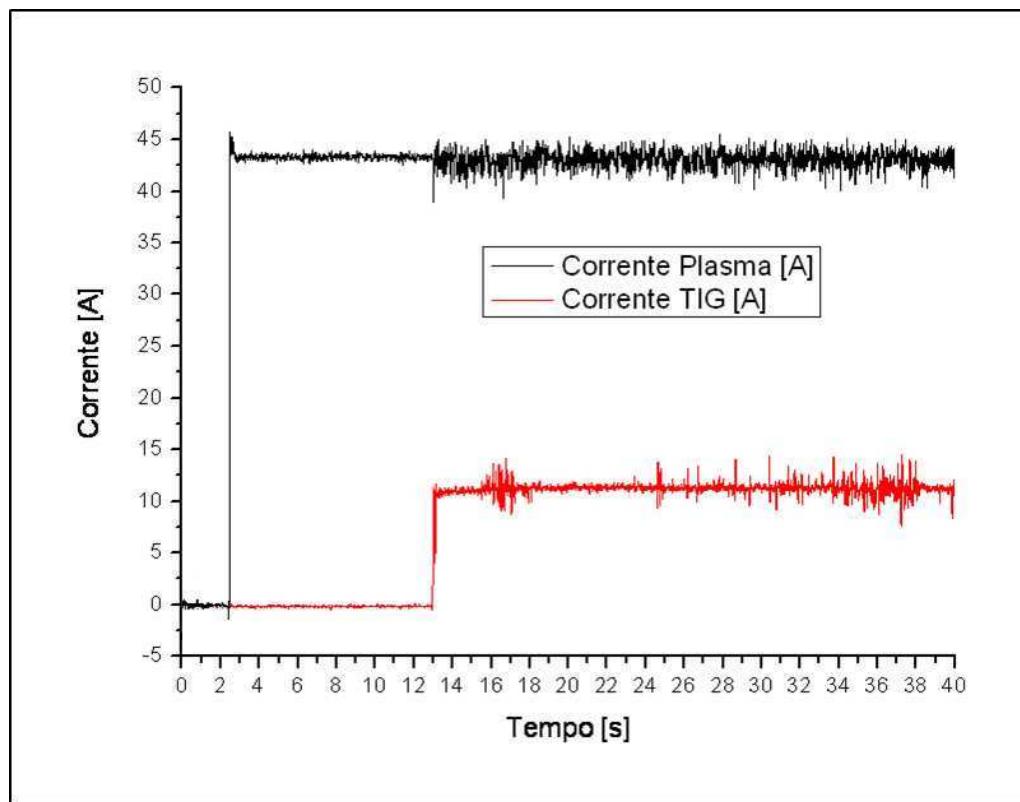


Figura 5.6 - Oscilograma de corrente apresentando o problema devido a ordem de início dos processos (plasma sendo ignitado antes do TIG)

Na Figura 5.7, é possível verificar que o sistema de medição do processo TIG detectou mudanças na tensão, mesmo antes de se tentar iniciar o processo.

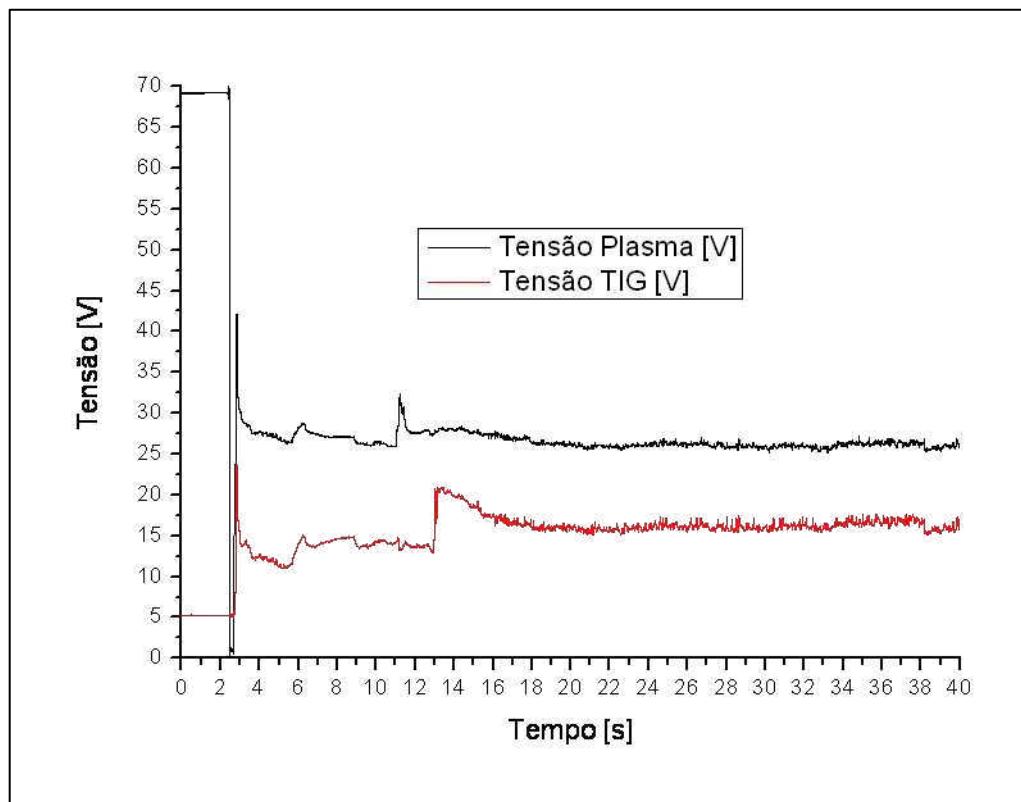


Figura 5.7 - Oscilograma de tensão referente ao oscilograma da Figura 5.6

5.1.5 GASES PARA O PROCESSO

Segundo Resende (2009), a tocha Plasma-MIG do Laprosolda possui três entradas de gás, gás interno, intermediário e externo, que devem ser devidamente alimentadas para o funcionamento correto. Ainda segundo esse autor, para um processo Plasma-MIG convencional é possível fazer combinações de gases ativos para modificar as características do arco e melhorar o processo Plasma-MIG.

Porém, como o processo foi modificado para possibilitar a utilização de um eletrodo de tungstênio no local do eletrodo MIG/MAG, foi utilizado apenas argônio puro na tocha (tanto para gás interno, como para intermediário e externo), pois gases ativos podem reagir com o eletrodo de tungstênio e destruí-lo.

5.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Através da montagem representada pela Figura 5.5, tentou-se verificar a influência que um arco exerce sobre o outro, quando são concênicos. A princípio, utilizou-se os eletrodos (Plasma e TIG) na polaridade negativa, ou seja, emitindo elétrons para a chapa de teste. A vantagem de se utilizar os eletrodos na polaridade negativa é que pode-se tirar vantagens da transmissão termiônica do eletrodo de tungstênio. Com esse tipo de emissão,

é possível utilizar correntes mais elevadas no processo TIG, o que permitiria que os testes fossem realizados com uma ampla faixa de corrente.

Entretanto, verificou-se um desgaste excessivo do eletrodo Plasma quando ele foi utilizado com a polaridade negativa. A Figura 5.8 apresenta o desgaste observado pela emissão de elétrons pelo eletrodo Plasma.



Figura 5.8 - Eletrodos Plasma apresentando desgaste excessivo por serem utilizados na polaridade negativa após curto período de teste

Como o eletrodo Plasma é de uso exclusivo para o modelo da tocha de Plasma-MIG utilizada, sendo ele caro e de aquisição demorada (não há fabricante nacional), o experimento teve de ser adequado à conservação desse eletrodo. Com isso, os testes tiveram que ser realizados com a tocha na polaridade positiva, pois essa é a polaridade recomendada pelo fabricante da tocha e do eletrodo Plasma.

Com a polaridade positiva, foi necessário substituir o eletrodo TIG por um de tungstênio puro (marcação ponta verde), sem adição de tório, com as mesmas dimensões (2,4 mm de diâmetro). Entretanto o eletrodo não suportou correntes TIG superiores a 50 A, causando um aumento exagerado de desgaste da ponta do eletrodo. Por outro lado, ao se trabalhar com correntes baixas (menores que 20 A), o arco ficava instável, podendo surgir na lateral do eletrodo, como indica na Figura 5.9. Com isso a corrente TIG foi limitada entre 20 a 50 A.

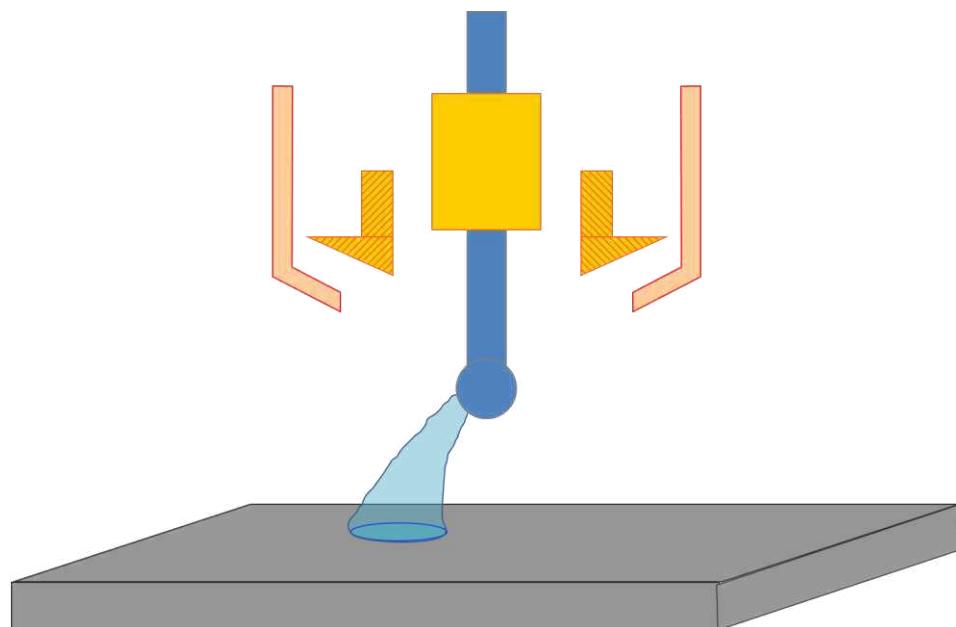


Figura 5.9 - Comportamento do arco quando a corrente é inferior a 20 A. O arco surje na lateral do eletrodo

Variou-se, também, a corrente do arco Plasma para avaliar a influência dela na tensão do arco TIG. Resende (2009) aconselha uma corrente mínima do Plasma em 30 A, utilizando em seu trabalho uma corrente máxima de 120 A. Porém o eletrodo TIG não suportou correntes do Plasma superiores a 60 A. Desta forma, tentou-se utilizar três correntes de plasma 30, 45 e 60 A.

A Figura 5.10 apresenta os parâmetros geométricos de montagem da tocha, onde esses valores foram escolhidos de forma a que o arco TIG tivesse um comprimento de 10 mm:

- RM – 17 mm (padrão da tocha);
- RP – 9 mm (Padrão da tocha);
- DTP – 8 mm;
- DBCP – 25 mm (RM + DTP);
- AT – 10 mm;
- EP – 7 mm (DTP + RP - AT);
- Comprimento do arco Plasma – 17 mm (RP + DTP).

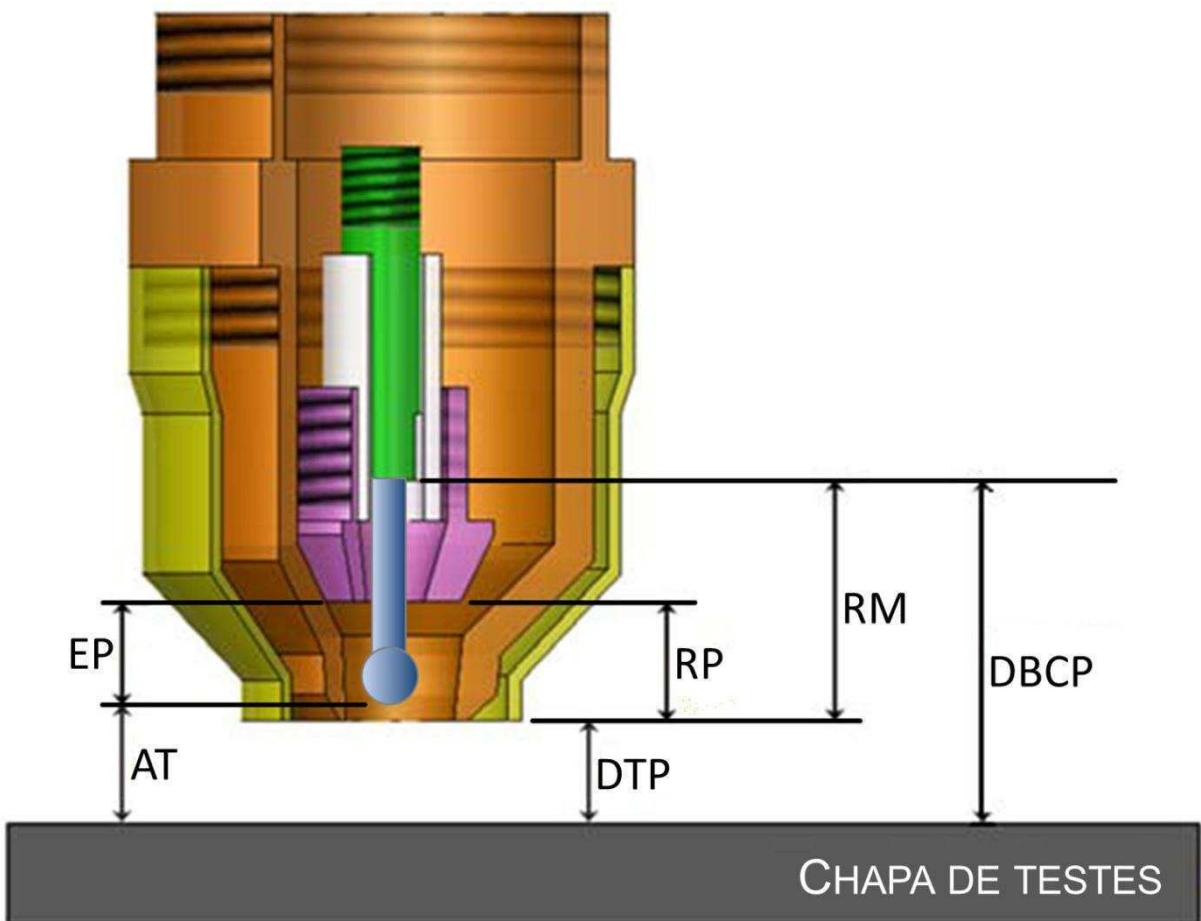


Figura 5.10 - Vista esquemática do posicionamento dos principais elementos da tocha Plasma-MIG modificada para acomodar o eletrodo TIG: DTP = Distância da Tocha a Peça; RP = Recuo do eletrodo Plasma; RM = Recuo do bico de contato MIG/MAG adaptado; DBCP = Distância do Bico de Contato MIG/MAG à Peça; EP= Comprimento do eletrodo que possivelmente será envolvido pelo arco Plasma; AT = comprimento do arco TIG (Adaptado de RESENDE 2009)

Por fim, pode-se resumir a metodologia para verificar a influência mútua entre arcos híbridos concêntricos, sendo:

- Processo Plasma e o TIG com arcos concêntricos;
- Argônio como gás interno, intermediário e externo;
- Os eletrodos (Plasma e TIG) ligados na polaridade positiva;
- Acionamento dos processos = TIG depois Plasma;
- O processo TIG foi configurado para que a corrente pulsasse de 20 a 50 A;
- As correntes de Plasma foram reguladas em 30, 45 e 60 A.

E como as máquinas utilizadas operaram com a característica estática do tipo corrente constante (impondo o valor da corrente), foi utilizado o oscilograma da tensão para avaliar a influência entre arcos em processos híbridos concêntricos.

5.3 RESULTADOS

Pela Figura 5.11 é possível verificar os instantes em que se iniciaram os processos TIG (a 16 s) e Plasma (a 34 s), com o TIG em pulsação de corrente entre 20 e 50 A, duração do ciclo de 2 s, e a corrente de Plasma de 30 A.

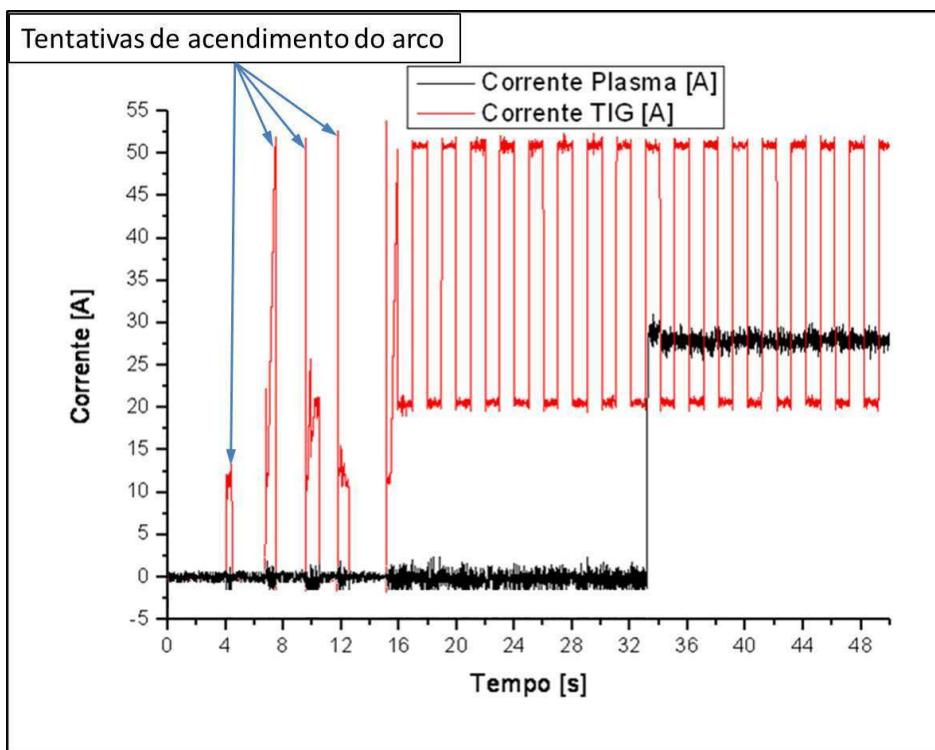


Figura 5.11 - Oscilograma de corrente das fontes Plasma e TIG (fonte do Plasma regulada para 30 A e a fonte TIG regulada para pulsar entre 20 e 50 A, com tempo de pico e de base de 1 s)

Já a Figura 5.12 apresenta o oscilograma das tensões TIG e Plasma para a configuração das correntes apresentadas na Figura 5.11. Ainda na Figura 5.12 é possível verificar que no intervalo de 18 a 33 s a tensão do processo TIG oscila na sua forma natural, com um formato mais suave. No intervalo de 34 s (inicio do processo Plasma) a 46 s é possível notar a mudança no comportamento da tensão do TIG que deixa de ser suave e torna-se mais abrupta, se assemelhando a uma onda quadrada. Nesse intervalo ainda é possível verificar oscilações na tensão do arco Plasma, que acompanham as oscilações da tensão TIG. Após os 46 s ocorre o término das oscilações de ambas as tensões.

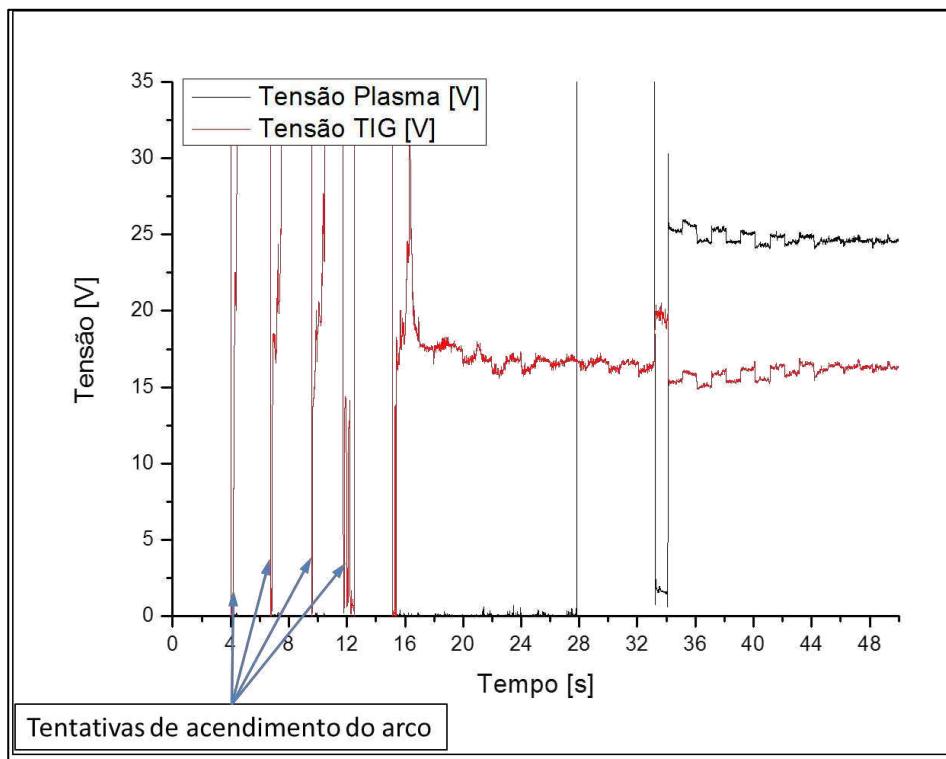


Figura 5.12 - Oscilograma de tensão referente ao oscilograma da Figura 5.11, demonstrando a influência que um arco exerce na tensão do outro

Não ocorreriam oscilações na tensão do Plasma se não houvesse a presença do arco TIG, pois não há variações na corrente Plasma. Isso sugere que o arco TIG interfere no comportamento do arco Plasma. Entretanto, após 46 s nota-se o término da oscilação de ambas as tensões, apesar da corrente TIG continuar variando. Isso demonstra que a partir deste período a influência do arco Plasma é superior a do TIG, cessando as oscilações.

Em um processo a arco pulsado, o tamanho do arco muda de acordo com a corrente, sendo ele mais largo para as correntes de pico e mais estreito para as correntes de base. Na configuração utilizada nessa etapa, o arco pulsante (TIG) é envolvido por um arco mais largo (Plasma) que cria condições favoráveis para a passagem da corrente de base e de pico do arco pulsante, desta forma não haveria a necessidade do arco TIG em se expandir e contrair, já que a corrente desse processo pode aproveitar o volume do arco Plasma. Entretanto, isso não ocorre imediatamente à abertura do arco Plasma, pois como mostrado na Figura 5.12, o sistema apresenta um período transitório, onde ainda ocorrem oscilações na tensão TIG, mesmo com o seu arco sendo envolvido pelo arco Plasma, até à acomodação. Esse fenômeno corre mesmo para correntes mais elevadas do Plasma, como mostrado a seguir.

Pela Figura 5.13 é possível verificar os instantes em que se iniciaram os processos TIG (a 9 s) e Plasma (a 17 s), com o TIG em pulsação de corrente entre 20 e 40 A, duração do ciclo de 1 s, e a corrente de Plasma de 45 A.

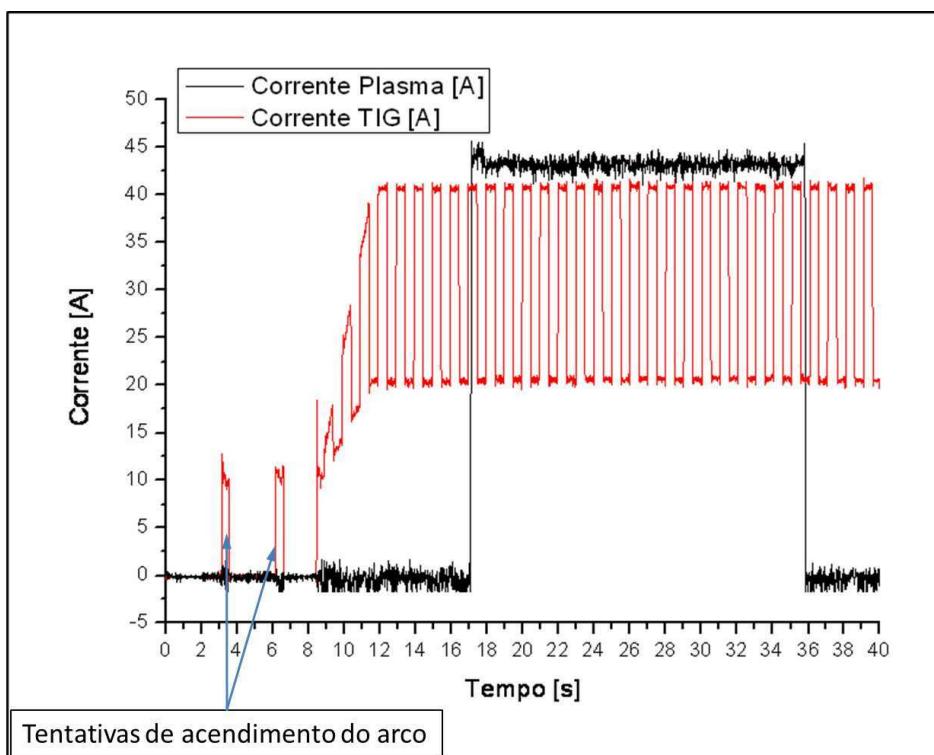


Figura 5.13 - Oscilograma de corrente das fontes Plasma e TIG (Fonte do Plasma regulada para 45 A e fonte TIG regulada para pulsar entre 20 e 40 A, com tempo de pico e de base de 0,5 s)

A Figura 5.14 apresenta o oscilograma das tensões TIG e Plasma para a configuração das correntes apresentadas na Figura 5.13. Como no caso anterior (Figura 5.12), é possível verificar mudanças no comportamento da tensão TIG a partir de 18 s, o que corresponde ao início do processo Plasma e o início da interação dos arcos híbridos. Assim como no caso anterior, também é possível verificar que o arco TIG causa oscilações no oscilograma da tensão do Plasma e o arco Plasma tende a diminuir a amplitude dessas oscilações. Ainda na Figura 5.14 verifica-se que quando o processo Plasma é desligado (36 s), a tensão TIG volta a oscilar normalmente, pois agora o arco TIG não pode mais utilizar o volume do arco Plasma para conduzir a sua corrente, tendo que se expandir e contrair de acordo com a sua corrente.

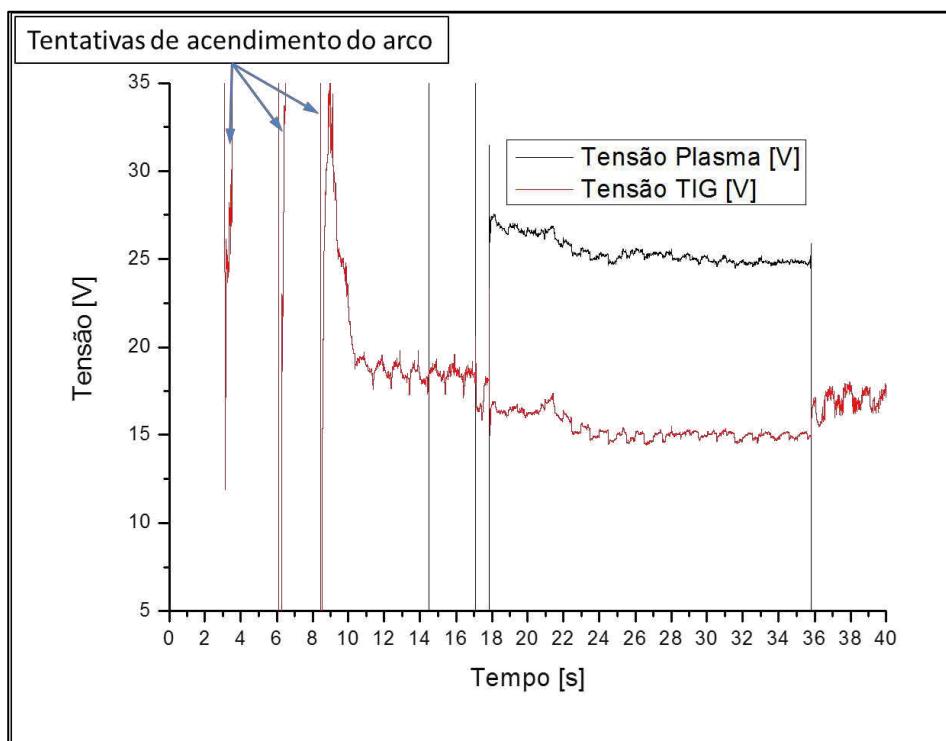


Figura 5.14 - Oscilograma de tensão referente ao oscilograma da Figura 5.13, demonstrando a influência que um arco exerce na tensão do outro.

Através da Figura 5.15 verifica-se os instantes em que se iniciaram os processos TIG (a 6 s), com os pulsos de corrente entre 20 e 50 A e duração do ciclo de 2 s, e Plasma (a 24 s), com corrente de 60 A.

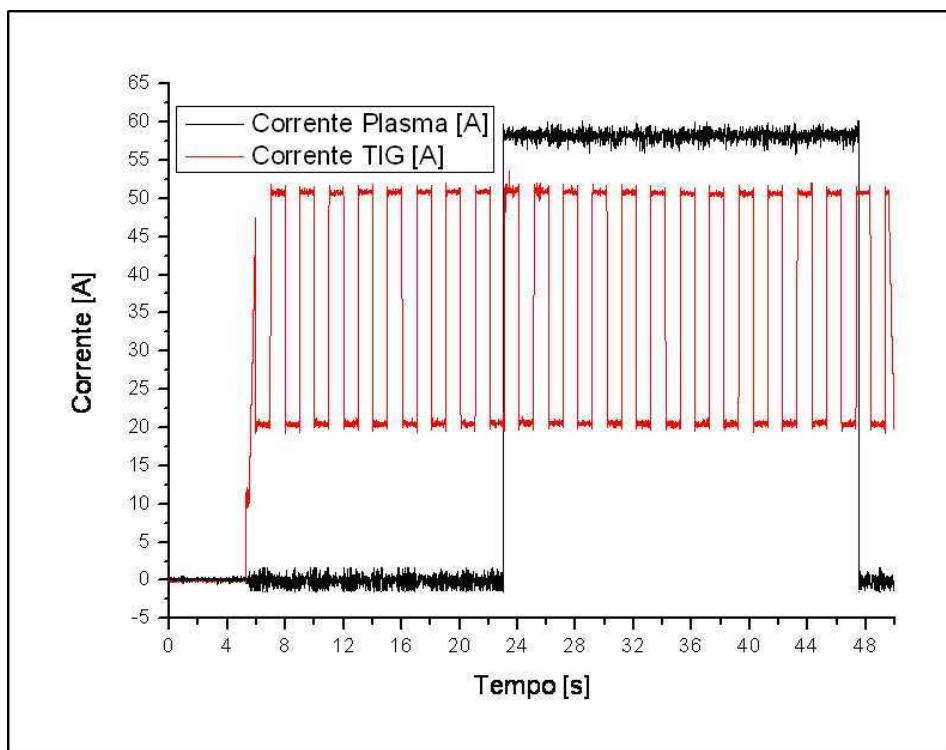


Figura 5.15 - Oscilograma de corrente das fontes do Plasma e do TIG (Fonte do Plasma regulada para 60 A e fonte TIG regulada para pulsar entre 20 e 50 A, com tempo de pico e de base de 1 s)

A Figura 5.16 apresenta o oscilograma das tensões TIG e Plasma para a configuração das correntes apresentadas na Figura 5.15. No oscilograma das tensões é possível verificar as mudanças no comportamento da tensão TIG a partir de 24 s, o que corresponde ao início do processo Plasma e o início da interação dos arcos híbridos. Neste caso, o eletrodo TIG não suportou o calor do arco Plasma com 60 A, fundindo-se rapidamente. Isso pode ser verificado pelo aumento da tensão TIG no intervalo de 26 a 30 s da Figura 5.16.

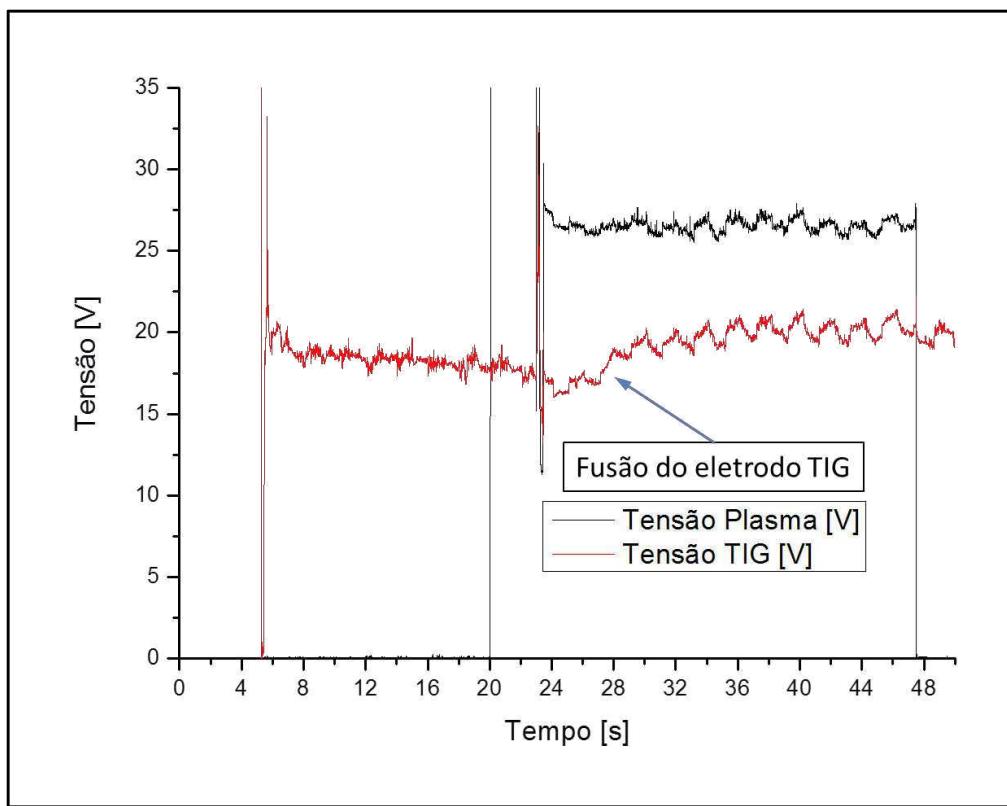


Figura 5.16 - Oscilograma de tensão referente ao oscilograma da Figura 5.15, demonstrando fusão do eletrodo TIG no intervalo de 26 a 30 s e a influência do arco TIG na tensão do arco Plasma

Devido a fusão, a ponta do eletrodo TIG recuou para dentro da tocha, posicionando-se antes do eletrodo Plasma. Desta forma, neste experimento o eletrodo TIG e seu arco não ficaram totalmente envolvidos pelo arco Plasma. Entretanto, o arco TIG ainda exerceu influência na tensão do arco Plasma, como pode ser visto no intervalo de 30 a 47 s da Figura 5.16, porém não há indícios do amortecimento das oscilações, pois dessa vez o arco TIG não estava totalmente envolvido pelo arco Plasma, necessitando expandir e contrair de acordo com a sua corrente.

Além dos oscilogramas, a ponta do eletrodo TIG também apresentou aspectos interessantes, com uma superfície brilhante após os testes com os arcos híbridos. O eletrodo de tungstênio puro próprio para TIG possui uma cor cinza e é fosco. Quando esse

eletrodo é utilizado apenas como TIG, ele escurece e começa a ter um tom azulado, mesmo utilizando proteção gasosa inerte e com vazão adequada. Entretanto, após os testes com os arcos híbridos o eletrodo apresentou uma superfície mais clara e muito mais brilhante do que a sua coloração original, como se todos os óxidos dele tivessem sido removido. A Figura 5.17 ilustra este efeito sobre o eletrodo de tungstênio.



Figura 5.17 - A esquerda parte de um eletrodo que não se modificou; no meio, eletrodo utilizado somente com TIG; à direita, o eletrodo utilizado no arco híbrido Plasma-TIG (sua superfície ficou tão brilhante que refletiu a câmera que formou a imagem de um círculo preto nele)

5.4 DISCUSSÃO GERAL

No caso das oscilações da tensão do arco Plasma causadas pela variação da corrente TIG, no início da interação dos arcos, se deve a um período transitório, no qual o arco híbrido não está totalmente formado, em que as pulsações de corrente do arco TIG provocam um aumento gradativo no tamanho do arco híbrido. Quando o arco híbrido alcança um tamanho máximo, ele torna-se estável, e a sua inércia assistida pela energia do processo plasma impedem que o arco reduza de tamanho quando a corrente TIG diminui de valor, cessando, assim, as oscilações de tensão. A Figura 5.18 mostra o formato do arco híbrido embrionário (formado após a ignição do arco plasma) e o formato final do arco híbrido após a sua estabilização.

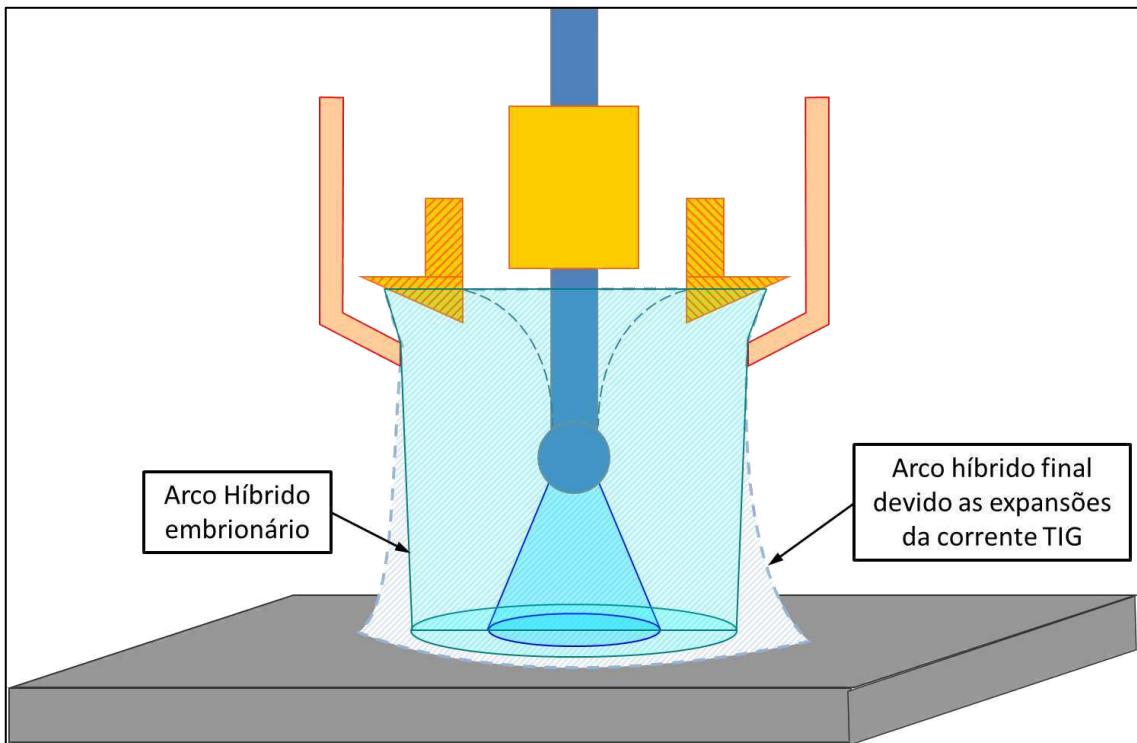


Figura 5.18 - Formato do arco híbrido, desde o instante de sua criação (arco embrionário) até a estabilização do processo

Sobre o efeito que causou a mudança na cor do eletrodo TIG, pode ser devido a emissões de elétrons do eletrodo TIG para o do Plasma, causando o processo de limpeza catódica, removendo a camada de óxido na superfície do material expondo o metal puro na superfície e deixado o eletrodo de tungstênio brilhando.

A corrente que sai do eletrodo TIG para o de Plasma é parte da corrente do circuito Plasma, que por algum motivo teve condições mais favoráveis de passar pelo eletrodo de tungstênio do que pelo arco. Isto, também, pode ter causado o desgaste do eletrodo de tungstênio quando foi utilizada uma corrente de plasmas maior (60 A).

Essers (1972) em seu estudo com Plasma-MIG verificou pequenos arcos entre os eletrodos, o que o levou a publicar que elétrons também poderiam utilizar o eletrodo MIG como caminho para a corrente, e não somente o arco. A Figura 5.19 tenta representar um possível caminho que os elétrons podem fazer, de forma a removerem os óxidos da superfície do eletrodo TIG.

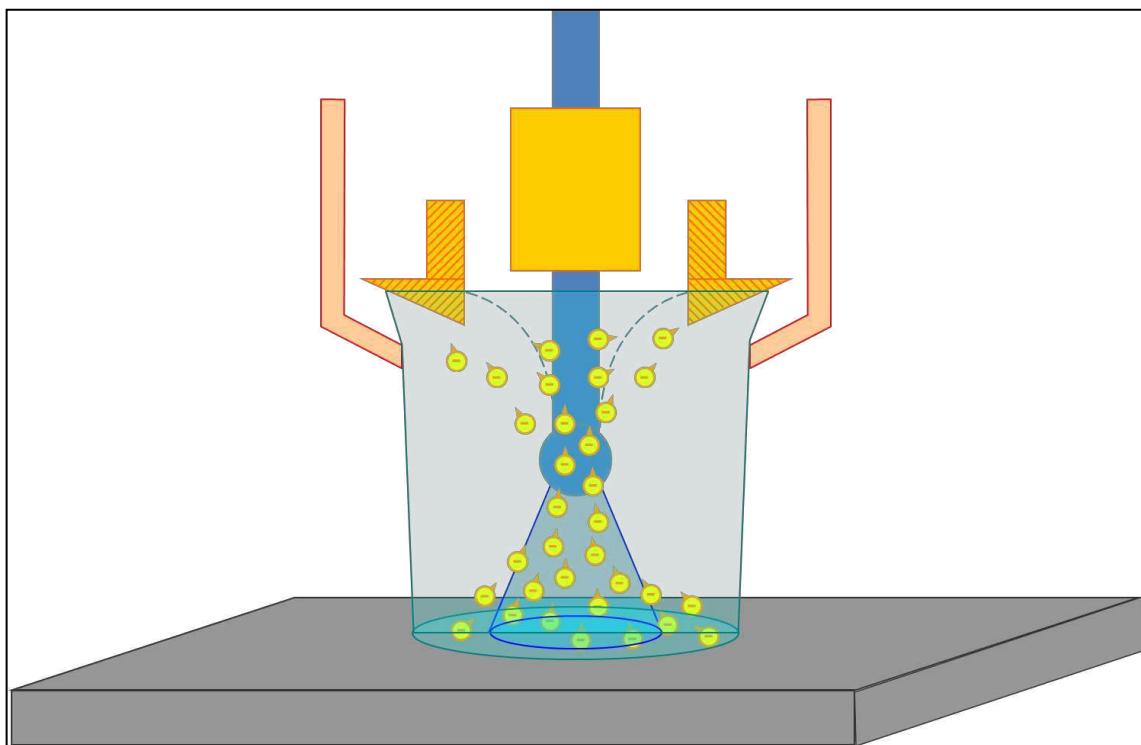


Figura 5.19 - Possível caminho dos elétrons que dessa forma provocaram a limpeza dos óxidos da superfície do eletrodo

Resumindo, pode-se dizer que os arcos concêntricos (o de TIG no centro e o de Plasma ao redor) se comportam como se fossem um arco híbrido só, pois as variações da tensão de um deles são refletidas nas mudanças da tensão do outro.

Capítulo VI

ESTUDO DO MATERIAL DO ÂNODO NO ACOPLAMENTO ARCO-ÂNODO

Para se estudar o efeito dos vapores metálicos na tensão do arco, foi primeiramente comparado a forma de acoplamento arco-ânodo para um ânodo de cobre (emite vapor metálico) e o outro de grafite (material refratário, que não emite vapores metálicos) e, em seguida, tentou-se observar o efeito de vapores de ferro na tensão do arco.

6.1 TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

Nessa etapa do trabalho, utilizou-se uma tocha TIG convencional com eletrodo de tungstênio de 2,4 mm de diâmetro, dopado com 2% de tória e ligado no polo negativo da fonte (eletrodo de tungstênio como cátodo e emissão termiônica). Como material de ânodo, utilizou-se uma chapa de cobre refrigerada por fluxo de água sob a face oposta. Nessa chapa, foi feito um furo para acomodar um inserto de grafite de 3 cm de diâmetro, faceando a superfície da chapa de cobre. Desta forma, dois ânodos foram obtidos em uma só placa de teste, um de cobre, que emite vapores metálicos quando aquecido pelo arco, e um ânodo refratário (grafite), que não emite vapores metálicos. Esta abordagem permite a princípio, de forma comparativa, verificar os efeitos de vapores no arco. A Figura 6.1 mostra a montagem dos ânodos de cobre e grafite com a refrigeração a água.

Para o registro e análise do comportamento do arco, em ambos os ânodos, os mesmos foram fotografados utilizando-se uma câmera digital comum, na qual foi acoplado o filtro plano “BAADER AstroSolar Safety Film”, o qual é capaz de reduzir a luminosidade sem prejudicar as formas nem as cores do arco. A tensão de arco foi medida com um multímetro digital.

No estudo do efeito dos vapores na tensão de arco, foram utilizadas chapas de aço com espessuras de 6,35 mm (denominada doravante de chapa grossa) e de 3,175 mm (denominada chapa fina). Espessuras diferentes de chapas foram escolhidas para que houvesse diferentes taxas de vaporização do ferro. A chapa grossa possui mais massa para distribuir o calor, levando a uma menor taxa de vaporização. Já a chapa fina, permite uma

maior taxa de vaporização, levando a uma maior concentração de vapor no arco e potencializando a influência deles.

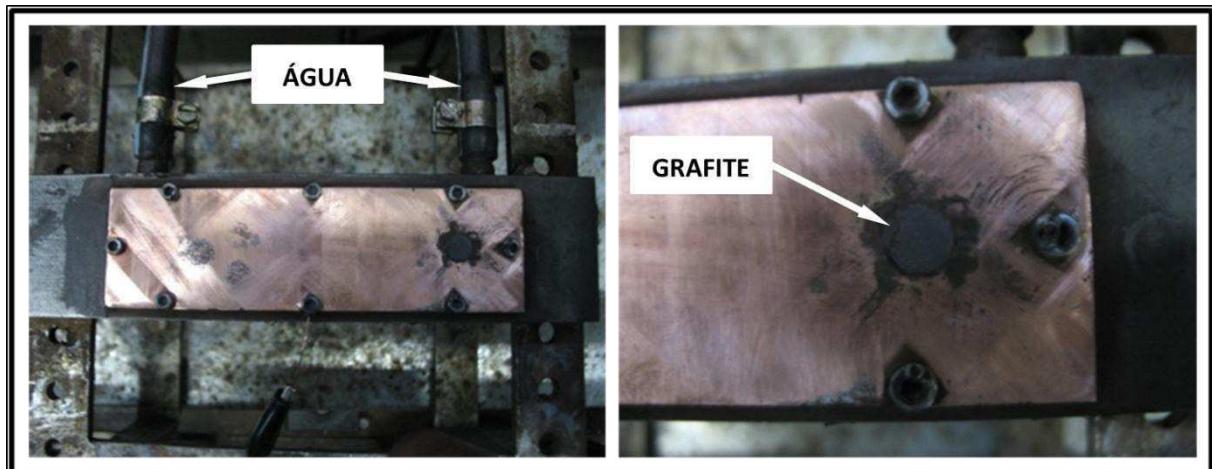


Figura 6.1 - Ânodo de cobre com o inserto de grafite (a figura à esquerda mostra todo o conjunto com o sistema de entrada e saída de água, enquanto à direita se mostra em detalhes o inserto de grafite utilizado)

Para comprovar a existência de vapores metálicos nos experimentos, foi utilizado um espectrômetro de emissão, cujas características físicas e técnicas são apresentadas na Figura 6.2. Este tipo de espectrômetro recebe as radiações emitidas e, após conveniente separação de seus comprimentos de onda por sistemas ópticos, tem suas intensidades respectivas medidas por meios de um CCD, correlacionando-as às concentrações correspondentes, através de curvas de calibração obtidas previamente.



Figura 6.2 - Espectrômetro do fabricante Spectral Products, modelo SM 242, com faixa de medição de 200 a 850 nm e resolução de 0,31 nm (SPECTRAL PRODUCTS, 2011)

6.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para o estudo do acoplamento do arco, o sistema foi montado de maneira que a ponta do eletrodo ficasse a uma distância fixa de 17 mm acima da chapa de teste durante todo o experimento. As análises do acoplamento do arco foram feitas através de fotografias do arco e pela queda de tensão do arco. Os experimentos foram executados sobre ambos os ânodos (cobre e grafite), cobrindo uma faixa de corrente de 20 a 100 A, variando-a de 10 em 10 A. Os testes foram feitos de duas maneiras, estática (sem movimento do arco sobre os ânodos) e dinâmica (movendo o arco sobre os ânodos), este último caso para verificar o comportamento do arco. Foram registradas as tensões médias e os arcos foram fotografados. Por fim, o espectrômetro foi utilizado para verificar a existência de vapores de cobre no acoplamento.

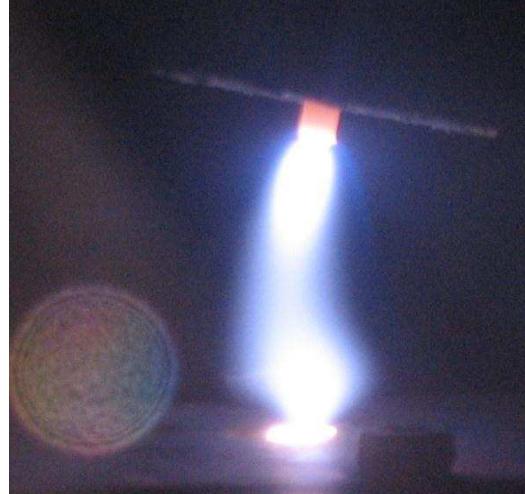
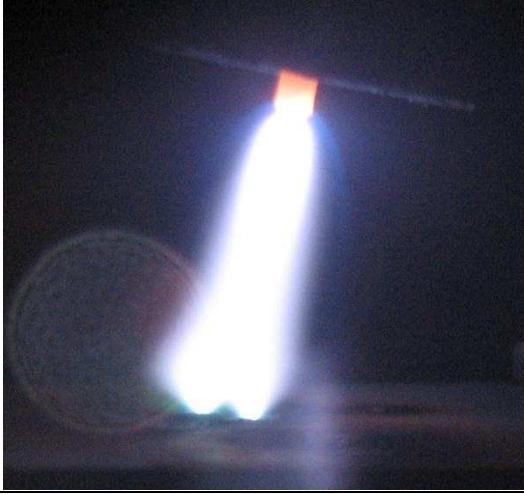
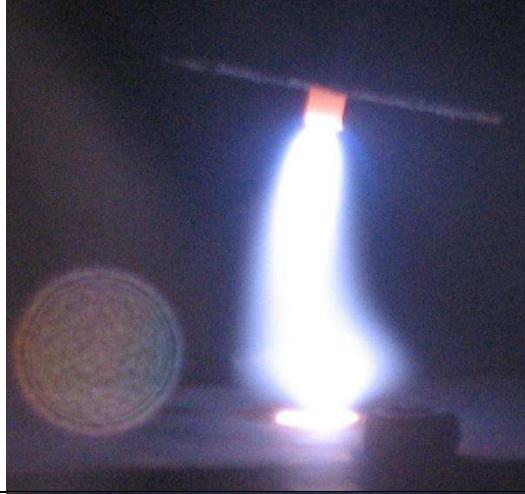
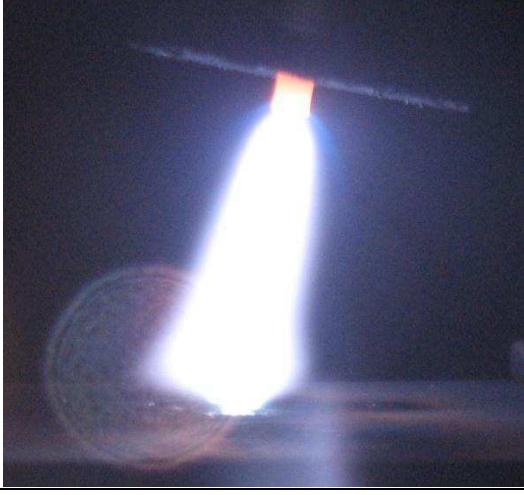
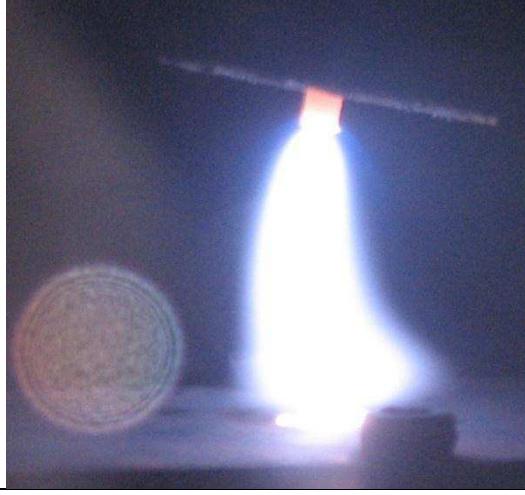
Já no estudo da influência dos vapores na queda de tensão do arco, utilizou-se o mesmo tipo de tocha com o mesmo tipo de eletrodo e corrente de 80 A, sendo os testes realizados sobre as chapas de aço, movendo-se o arco a uma velocidade de 15 cm/min. A regulagem das distâncias da ponta do eletrodo à peça levou em consideração dois pontos. Inicialmente citações de Allum (1983), para quem vapores de ferro não sobem mais do que 2 mm em um arco semelhante à utilizada nesse trabalho. Além disto, utilizou-se a informação Murphy (2010b), que em arco TIG a 90 A, vapores metálicos não exercem influência acima de 2 mm do ânodo. Assim, foram utilizadas nesse trabalho distâncias menores e maiores do que 2 mm, ou seja, 1 mm, 2 mm, 3,5 mm e 5,5 mm (não se utilizou comprimentos menores do que 1 mm, para evitar que o eletrodo tocasse a poça de fusão, e não maior do que 5,5 mm, pois um arco desse comprimento já apresenta uma concentração muito baixa de vapores). De forma similar, o espectrômetro foi utilizado para confirmar a presença de vapores de ferro no arco.

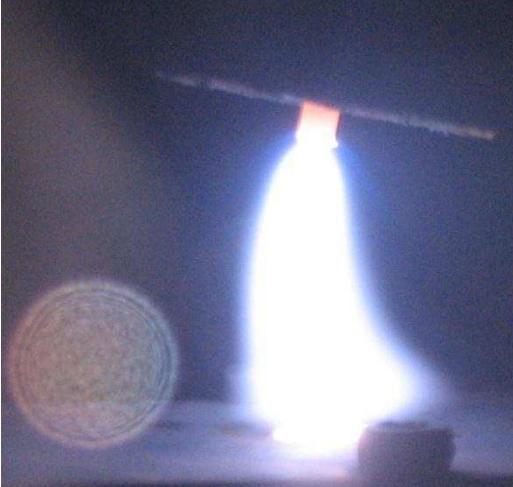
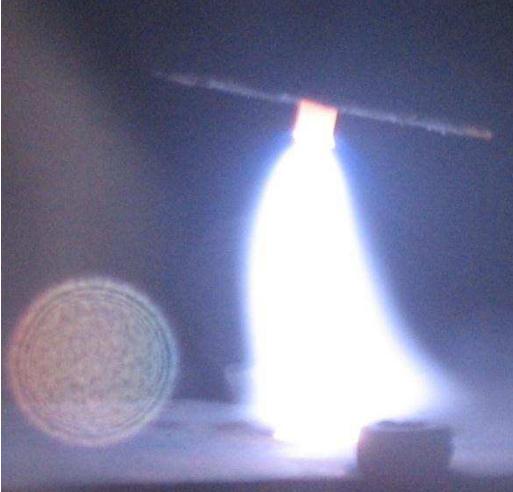
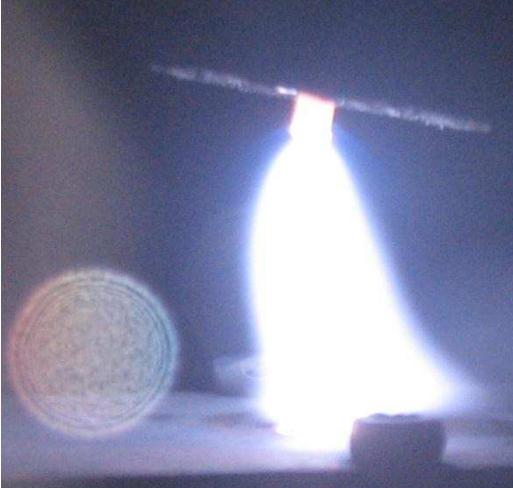
6.3 RESULTADOS

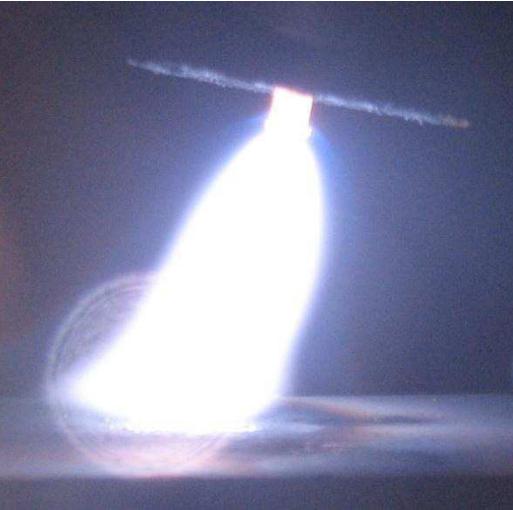
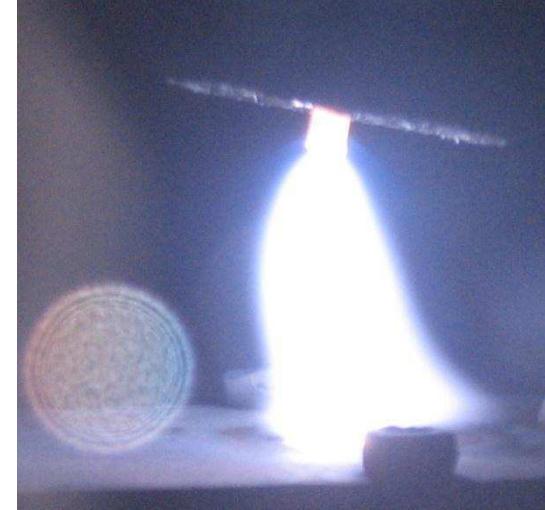
A Tabela 6.1 ilustra visualmente o comportamento do arco sobre o cobre em comparação com o comportamento do arco sobre o grafite, para as diversas correntes utilizadas. Nesta tabela, é possível verificar que quando o arco está sobre o grafite (material refratário e que não forma vapores metálicos) ele apresenta apenas um único ponto de acoplamento, enquanto que sobre o cobre é possível verificar diversos pontos de acoplamentos. Esta característica é mais marcante para os valores menores de corrente. Com o aumento da corrente, o acoplamento arco-grafite aumenta de tamanho, porém permanece sendo apenas único. Já no cobre, o aumento da corrente só aumenta o tamanho dos pontos de acoplamento (arco-cobre) até a corrente de 40 A. A partir desse ponto, o que

se observa é o aumento do número de pontos de acoplamento e a redução do tamanho deles.

Tabela 6.1 - Formas do acoplamento do arco sobre o cobre e sobre o grafite sob diversas correntes

Corrente	Arco sobre o cobre	Arco sobre o grafite
20 A	 A photograph showing a bright white arc between two electrodes. The arc is relatively narrow and focused. Below the arc, there is a circular, glowing area on a dark background, likely indicating the point of material removal or melting.	 A photograph showing a bright white arc between two electrodes. The arc is wider and more diffused compared to the copper case. Below the arc, there is a circular, glowing area on a dark background.
30 A	 A photograph showing a bright white arc between two electrodes. The arc is very intense and focused. Below the arc, there is a circular, glowing area on a dark background.	 A photograph showing a bright white arc between two electrodes. The arc is very intense and focused. Below the arc, there is a circular, glowing area on a dark background.
40 A	 A photograph showing a bright white arc between two electrodes. The arc is very intense and focused. Below the arc, there is a circular, glowing area on a dark background.	 A photograph showing a bright white arc between two electrodes. The arc is very intense and focused. Below the arc, there is a circular, glowing area on a dark background.

Corrente	Arco sobre o cobre	Arco sobre o grafite
50 A		
70 A		
90 A		

Corrente	Arco sobre o cobre	Arco sobre o grafite
100 A		

Pela Figura 6.3, é possível caracterizar esses diversos pontos de acoplamento no cobre pelas marcas deixadas. Esses pontos são pequenas poças de fusão criadas pelos múltiplos acoplamentos do arco nesse material. Essas pequenas poças não se uniram em uma grande poça, como ocorre no processo de soldagem comum, devido à elevada condutividade térmica do cobre e da presença do sistema de refrigeração. Desta forma, estes pontos são os de entrada dos elétrons no ânodo. Provavelmente, os vapores originados nessas pequenas poças de fusão causam um aumento na facilidade de ionização nas regiões próximas a elas (correspondente a maior condutividade elétrica do arco), o que favoreceu a passagem da corrente por esses pontos.



Figura 6.3 - Pontos de acoplamento arco-cobre (ânodo) para correntes de 50 A, 70 A e 100 A

Quando a corrente excedeu o valor de 40 A, ainda usando cobre como ânodo, aumentou-se o número de acoplamento arco-ânodo. Provavelmente, porque uma maior corrente implica em um arco com maior geração de calor, o que leva a possibilidade de mais pontos se fundirem.

Observou-se, também, o comportamento do arco ao ser movido sobre os diferentes ânodos. Quando era sobre o grafite, a conexão arco-grafite parecia deslizar com o movimento do arco. Já sobre o cobre, o comportamento depende da corrente utilizada. Para correntes de até 40 A, o arco se comportava como se os poucos pontos de acoplamento segurassem o arco, dando a impressão de que o arco tivesse “pequenas pernas” e o movimento se assemelhava com o de um “caminhar” sobre o cobre. Já para correntes acima de 40 A, o arco já se movia com menos sensação de estar sendo “seguro” pelo ânodo. Isto se deve a predominância do jato de plasmas, também conhecido como efeito Maecker (PFENDER; VEPREK, 2000), ou seja, maior rigidez do arco.

Esta diferença de comportamento do arco no ânodo de cobre entre correntes baixa e alta pode ser atribuída ao fato em correntes de até 40 A, o efeito do aumento da condutividade elétrica é predominante ao efeito do jato de plasma. Desta forma, é mais favorável energeticamente que as partículas que compõem o arco percorram um caminho maior, mas de maior condutividade, do que criar outro ponto de acoplamento. Mas para correntes acima de 40 A, o efeito do jato de plasma passa a ser predominante, ou seja, as partículas são forçadas a criarem outros pontos de acoplamento devido à força que são lançadas em direção ao ânodo.

Verificou-se também que ao se aproximar o arco a partir do cobre na direção do ânodo de grafite, ele tem a tendência de trocar o acoplamento arco-cobre para o arco-grafite. Mas ao se forçar o arco voltar para o cobre (movendo-o no sentido de sair do grafite), ele resiste a desfazer o acoplamento arco-grafite. Provavelmente porque o acoplamento arco-grafite necessita de menos energia do que o arco-cobre. Esta hipótese pode ser verificada pela Figura 6.4, que apresenta a característica estática do arco sobre o cobre e sobre o grafite, onde, para todas as correntes utilizadas, o arco demanda menos energia para se manter sobre o grafite. Interpolando a tensão total de arco (contida em curvas de características estáticas), pode-se dizer que o acoplamento também demanda menos energia, ao assumir que outras condições são iguais. É importante destacar que era de se esperar que vapores metálicos produzissem menor tensão na coluna do plasma (a curva de cobre deveria estar abaixo da de grafite), devido à facilidade de ionização. Mas, para este caso, o alto comprimento de arco utilizado e as observações de que os vapores só atuam em até pouco mais de 2 mm, justificam esses resultados. Dessa forma, os resultados apresentados na Figura 6.4 sugerem que a queda de tensão anódica do arco quando sobre o grafite é menor do que a queda de tensão anódica do arco sobre o cobre, pois foi utilizado o mesmo eletrodo e gás, alterando apenas o material do ânodo.

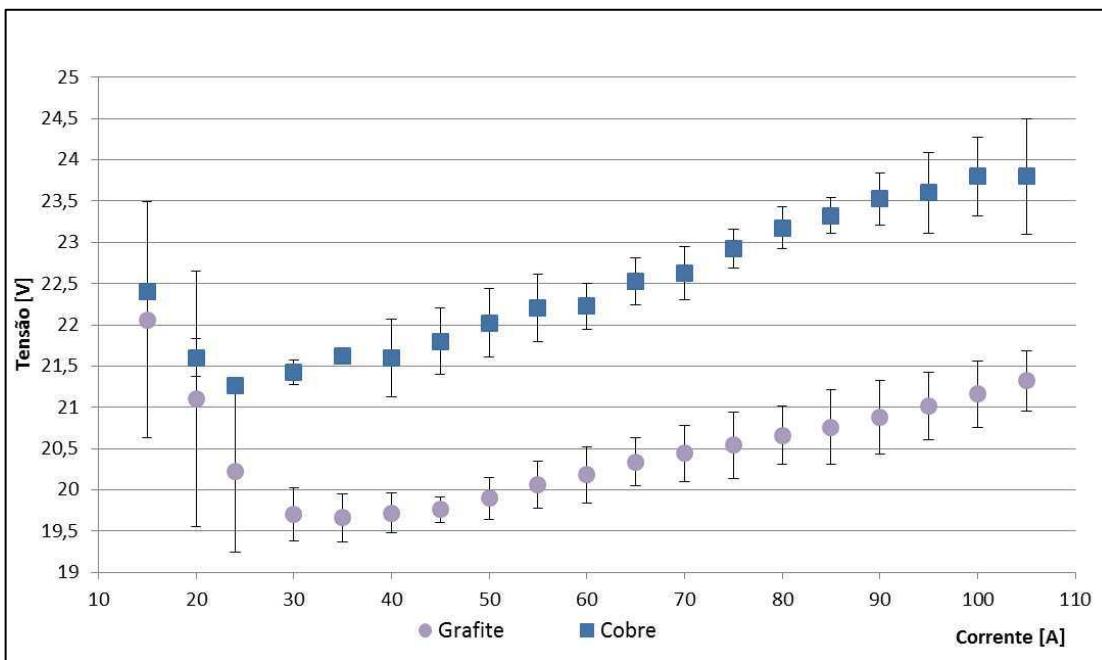


Figura 6.4 - Característica estática dos arcos, quando o ânodo é o cobre e quando é o grafite, para um comprimento de arco 17 mm

Devido aos efeitos que os vapores de cobre apresentaram na conexão arco-ânodo, foi desenvolvida uma técnica para estudar o efeito de vapores na queda de tensão do arco. Nessa etapa, utilizou-se chapas de testes de aço, com diferentes espessuras. É de se esperar que para mesma energia de soldagem, menores espessuras gerem mais vapor, em concordância com uma maior poça de fusão. Lembrando, vapores metálicos necessitam de menos energia para se ionizarem, o que deve levar a uma diminuição da tensão do arco. Entretanto, dos diversos elementos metálicos estudados por Cressault et al. (2008), os vapores de ferro são os que apresentam uma maior emissividade térmica em relação aos outros elementos estudados por esse autor, o que demandaria maior tensão. Este fato justifica o uso de um ânodo de aço.

A Figura 6.5 mostra os resultados obtidos para estes experimentos. Os pontos que representam os testes feitos sobre a chapa fina apresentam uma queda de tensão menor do que os da chapa grossa, fato que pode ser atribuído à maior quantidade de vapores emitidos pela chapa fina, que levou a um arco com uma condutividade elétrica maior (sobrepondo o efeito de fácil ionização sobre o de emissão térmica). Somando esses dois efeitos antagônicos, o resultado é uma variação pouco significativa no comportamento da tensão. Segundo Murphy (2010b), o efeito dos vapores metálicos sobre o valor da queda de tensão de arcos TIG é de diminuir-lá ligeiramente ou, dependendo da situação, de não interferir em seu valor. Por outro lado, outros fenômenos devem estar agindo nos experimentos da Figura 6.5, pois era de se esperar que para altos comprimentos de arco,

nos quais os efeitos dos vapores metálicos deveriam ser desprezíveis, as duas curvas deveriam ter a tendência de se encontrar.

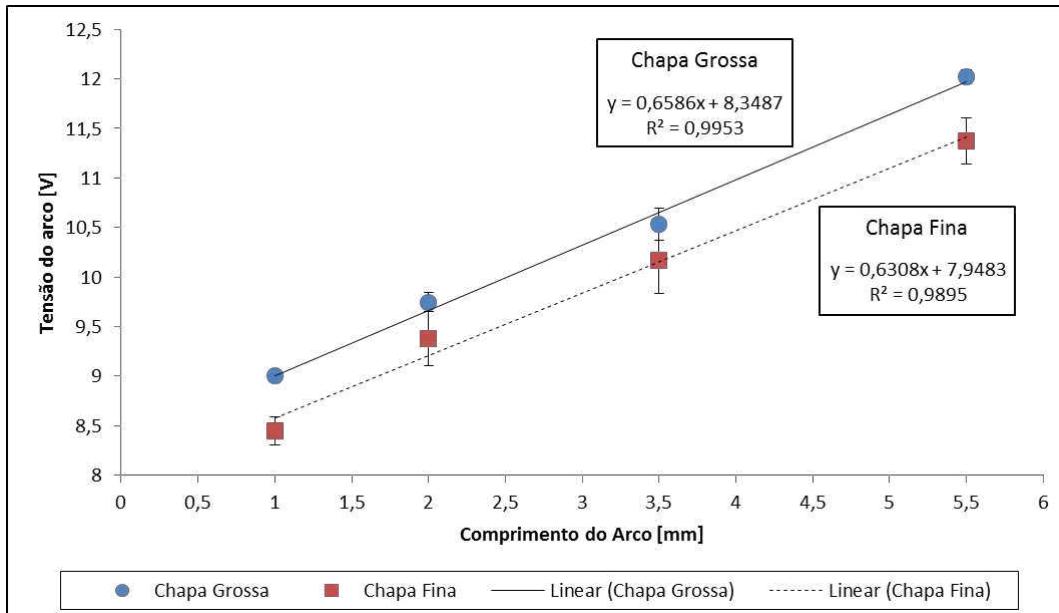


Figura 6.5 - Valores da queda de tensão de um arco de 80 A em função do seu comprimento e da espessura da chapa.

A tendência ao paralelismo entre as curvas da Figura 6.5 pode ser explicado se assumir que é a queda de tensão anódica a mais afetada pelos vapores de que outros componentes da tensão de arco (a saber, a queda de tensão na coluna e a da catódica). Desta forma, como a chapa fina apresenta uma maior taxa de vaporização, independente do comprimento do arco, e também apresenta uma menor queda de tensão anódica, devido a maior presença de vapores, e, com isso, apresenta uma menor tensão total de arco.

Para estudar a presença de vapores metálicos nos experimentos com o cobre e o aço, foi utilizado o espectrômetro, com o qual é possível identificar as linhas que correspondem à radiação característica dos elementos presentes quando ionizados. Os testes foram realizados sobre a chapa de cobre refrigerada e sobre a chapa de aço fina utilizando a corrente de 80 A e um arco com 10 mm de comprimento e tentou-se obter a radiação da região de conexão arco-ânodo.

De acordo com Gonzalez et al. (1997) e com os dados obtidos no site do NIST (2011), o ferro irradia com comprimentos de onda de aproximadamente 373, 376 e 382 nm (espectro no ultravioleta). Já o cobre, usando outras fontes (RAZAFINIMANANA et al., 1995, VEKLICH; BABICH, 2001) e os dados do NIST (2011), apresenta radiações com comprimentos de aproximadamente 510, 515 e 522 nm (espectro visível na faixa verde).

A Figura 6.6 mostra os resultados obtidos pelo espectrômetro sobre a chapa de cobre e sobre as chapas de aço. Como pode ser visto na figura, havia além de massiva quantidade de argônio ionizado, a presença de vapores de ferro e de cobre nos experimentos individuais sobre cada um destes materiais. Ainda nesta figura, é possível verificar, junto com a informação dos autores supracitados, que os vapores de ferro emitem radiação eletromagnética dentro da faixa de ultravioleta, não sendo possíveis de serem visualizados por câmeras fotográficas convencionais. Já os vapores de cobre emitem luz na faixa verde (de 490 a 565 nm) e podem ser detectados por câmeras convencionais. A Figura 6.7 ilustra uma radiação verde próximo à conexão arco-cobre, o que sugere ser a luz emitida pelos vapores de cobre obtidos durante os experimentos.

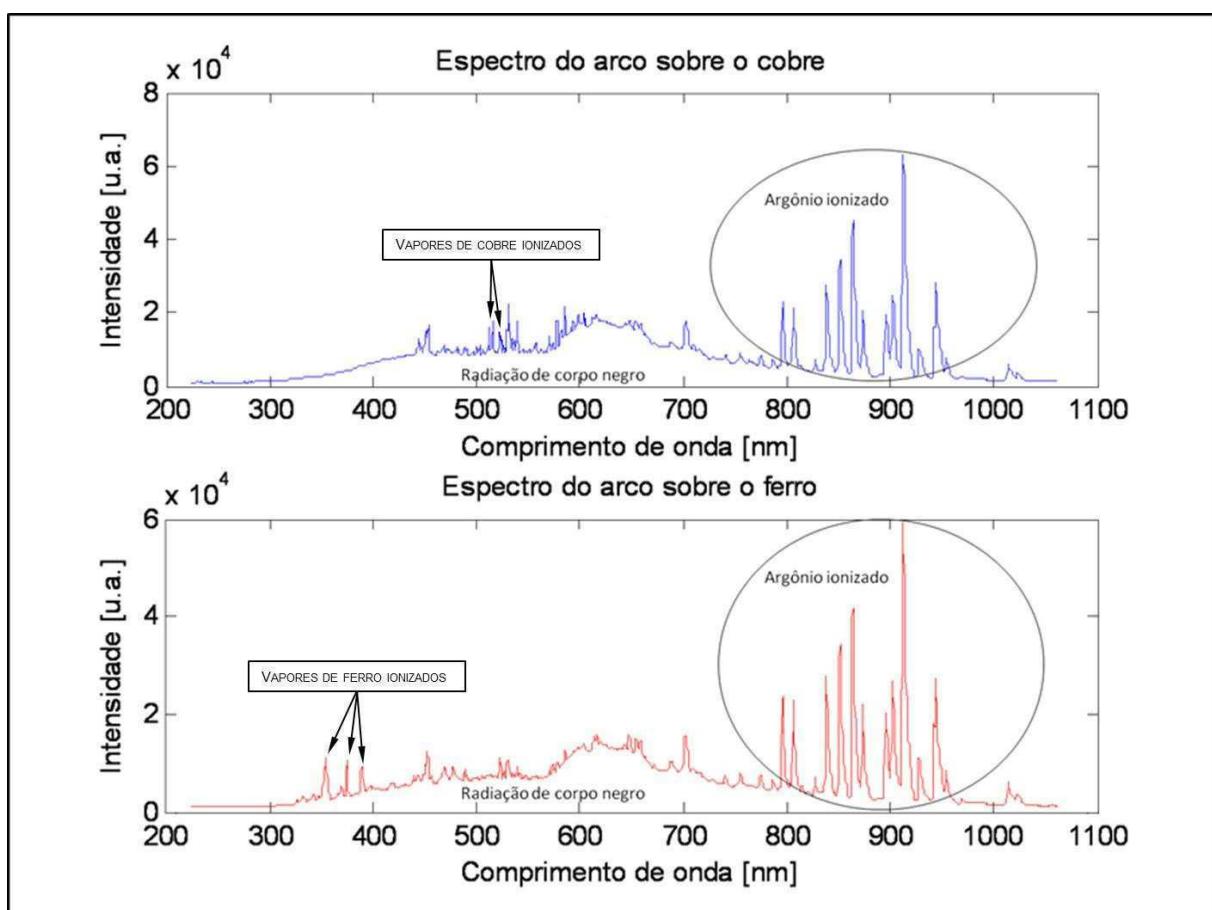


Figura 6.6 - Espectrografia de arcos TIG sobre o cobre (acima) e sobre o aço (baixo)



Figura 6.7 - Indícios de vapores de cobre junto ao ânodo (coloração verde), obtidos em experimentos com arco TIG de 20 A e comprimento de 17 mm sobre chapa de cobre

6.4 DISCUSSÃO GERAL

Os resultados indicam que o vapor metálico exerce um importante papel na conexão arco-ânodo. Comparando o ânodo de aço (que comprovadamente emitiu vapor de ferro) em chapa fina (maior volume de metal fundido) em relação ao ânodo em chapa grossa, demandou menos tensão de arco para condições similares. Este achado pode ser considerado uma evidência da ajuda do vapor metálico no acoplamento do arco. Não se pode, através desse trabalho, afirmar que a ação do vapor seja sobre a conexão anódica ou na região da coluna de plasma mais próximo da chapa.

Mas, o ânodo de cobre (que comprovadamente também emitiu vapor, de cobre) em relação ao ânodo de grafite demandou mais tensão. Este resultado indica que a emissão de vapores não é o fator governante da energia potencial (tensão) gasta na região do acoplamento. No caso dos ânodos de aço, o fenômeno físico-químico no acoplamento pode ser considerado o mesmo, variando-se apenas a intensidade. Já a comparação entre os ânodos de cobre e de grafite esbarra nas propriedades diferentes dos materiais. O grafite teria a tendência de se aquecer até altas temperaturas (ânodo bem mais aquecido) do que o cobre refrigerado. Além, o volume esperado de vapor de cobre deve ter sido pequeno, pela refrigeração (não havia poça de fusão).

Ainda no mesmo raciocínio acima, os diversos pontos de acoplamento no cobre refrigerados se devam aos micro-pontos de fusão. Uma evidência seria que quanto maior a corrente (acima de 40 A), mas pontos de acoplamento são formados (maior calor por unidade de área). Nas correntes mais altas, pode-se até pensar que estes pontos se emendariam e ficariam como uma área, como aconteceu no caso do ânodo de aço (devido a sua menor condutividade térmica, permite a formação de poça e não de pontos fundidos).

Mesmo reconhecendo o efeito dos vapores como fator facilitador de ionização, existem vários fenômenos concorrente no acoplamento arco-ânodo. Por exemplo, o acoplamento pode ser direcionado para um ânodo não favorável devido ao direcionamento dado à coluna de plasma pelas forças de jato de plasma. Tem de levar em conta também a emissividade térmica que seria maior devido a vapores. Mas este efeito deve se pronunciar apenas sobre a coluna e não sobre o acoplamento (afeta a tensão total do arco).

Capítulo VII

CONCLUSÕES

Baseado nas condições e metodologias aplicadas nesse trabalho, nos resultados obtidos e na análise deles, obteve-se as seguintes conclusões:

- 1) A intensidade de troca de calor do arco elétrico com o meio ambiente influí nas características dele. Nas condições quase-adiabática, a tensão de arco é menor, ou seja, é demandada menor energia para manter o arco. Assim, uma menor taxa de troca de calor leva a uma menor taxa de desionização, consequentemente a uma menor demanda de tensão para manter o arco;
- 2) Arcos concêntricos se comportam como se fossem um único arco híbrido. As variações da tensão de um deles são refletidas nas mudanças da tensão do outro. Entretanto, para alcançar o estado de um único arco híbrido, precisa-se de um período de transição;
- 3) Ainda em relação ao arco híbrido, o arco interno, ao ser envolvido pelo arco externo, se comporta como no arco adiabático, ou seja, demanda menos tensão para se manter.

Uma conclusão final destas duas etapas do trabalho, que ainda carece de maiores investigações, é de que se o plasma oferece resistência à passagem de elétrons (“resistor”), pelo menos uma fração importante da queda de tensão de sua coluna se deve à necessidade de choques de elétrons para manter ionizada as partículas que estão dinamicamente se desionizando devido à perda de calor.

- 4) Vapores metálicos, formados devido ao aquecimento na conexão arco-anodo, são pontos preferenciais de acoplamento do arco sobre o ânodo; o arco se acopla mais facilmente caso ocorra evaporações do material do ânodo;
- 5) Entretanto, vapores metálicos não governam a queda de tensão demandada pelo arco, podendo esta ser até menor utilizando-se ânodos não geradores de vapores.

Capítulo VIII

PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

- 1) Através do levantamento das relações “tensão de arco em função de seu comprimento” para diferentes condições (diversos ânodos, arco quase-adiabático e arco livre), determinar dados básicos, tais como as tensões específicas da coluna de arco e as tensões anódica e catódica, necessários para a busca das explicações dos fenômenos observados no arco elétrico;
- 2) Melhorar a metodologia proposta de medição da queda de tensão no eletrodo de tungstênio, variando-se o comprimento dele, chegando a determinar o valor da queda de tensão da conexão pinça-eletrodo, que é importante para chegar à tensão “pura” de arco;
- 3) Estudar o formato do arco Plasma, como o arco externo do Capítulo 5 (que, supostamente, tem um formato do corpo oco não vazado), como componente do arco híbrido, utilizando o eletrodo TIG como sonda (sem corrente) com extensões diferentes, para avaliar o formato do arco Plasma;
- 4) Partindo dos resultados da realização das propostas 1 e 2, executar testes com diferentes ânodos, com o intuito de determinar o papel dos vapores metálicos no arco (por exemplo, para saber por qual deles a tensão é mais afetada, na da coluna de plasma ou a da região anódica).

Capítulo IX

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLUM, C. J. Power dissipation in the column of a TIG welding arc.**Iopscience**: Journal of Physics D: Applied Physics, [s. L.], v. 11, n. 16, p.2149-2165, 14 nov. 1983.

APS - NEWS. Março de 2006., vol. 15, número 3.

AWS 1987, **Welding Handbook – Welding Technology**, American Welding Society, Eighth Edition, Vol. I, 638p.

AYRTON, H.. **The electric arc**. Nova York: The D. Van Nostrand Company, 1902. 479 p.

BARBOSA, J. C. P.. **Análise por Meio de Espectroscopia de Emissão Óptica das Espécies Ativas em Nitretação Iônica e Gaiola Catódica**. 2007. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

BEBIANO, D. F. V.. **Monitoração e localização de defeitos na soldagem TIG utilizando técnicas de espectroscopia**. 2008. 125 f. Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília, Brasilia, 2008.

BERTULANI, C. A.. **O Efeito Hall Quântico** Disponível em: <<http://www.if.ufrj.br/teaching/Hall/Hall.html>>. Acesso em: 14 fev. 2011.

BESSEMER, H.. **Sir Henry Bessemer, F.R.S.: An autobiography**. Londres: Offices Of Engineering, 1905. Disponível em: <<http://www.history.rochester.edu/ehp-book/shb/start.htm>>. Acesso em: 07 jan. 2011.

CARVALHO, G. M.. **Medida da temperatura de íons em um propulsor a plasma do tipo Hall via espectroscopia óptica**. 2008. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Brasilia, 2008.

CHEMINAT, B; ANDANSON, P. Conduction in an electric arc column contaminated by copper vapour. **Iopscience**: Journal of Physics D: Applied Physics, [s. L.], v. 18, n. 11, p.2183-2192, 14 nov. 1985. doi: 10.1088/0022-3727/18/11/008.

- CHEN, F. F. **Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion – Volume 1: Plasma Physics.** 2. ed. Los Angeles: Plenum Press, 1985. 421 p.
- CHOUDHURI, A. R.. **The physics of fluids and plasmas: an introduction for astrophysicists.** Cambridge: Cambridge University Press, 1998. 427 p.
- COSTA, A. V., PONOMAREV, V. & SCOTTI, A., 2003 **Desenvolvimento de uma metodologia para determinação de quedas de tensão em arcos com transferência em vôo livre.** 2º COBEF, de 18 a 21 de maio de 2003
- COSTA, A. V.. **Desenvolvimento de metodologias para a determinação de quedas de tensão em arcos de soldagem.** 2003. 210 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2003.
- CRESSAULT, Y et al. Influence of metallic vapours on the properties of air thermal plasmas. **Iopscience:** Plasma Sources Science and Technology, [s. L.], v. 17, n. 13, p.1-9, 8 jun. 2008. doi: 10.1088/0963-0252/17/3/035016.
- DAVY, H.. **Elements of chemical philosophy.** Londres: W. Bulmer And Co. Cleveland-row, 1812. 511 p.
- ESAB, **Eletrodos Revestidos OK.** 2005. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/biblioteca/upload/1901097rev0_ApostaEletrodosRevestidos.pdf>. Acesso em: 13 janeiro 2011.
- ESSERS, W. G. et al. Plasma-MIG welding – a new torch and arc starting method. **Metal Construction**, p.36-42, jan. 1981.
- FARMER, A. J. D.; HADDAD, G N. Rayleigh scattering measurements in a free-burning argon arc. **Iopscience:** Journal of Physics D: Applied Physics, [s. L.], v. 21, n. 3, p.426-431, 14 mar. 1988. doi: 10.1088/0022-3727/21/3/008.
- GIROTTI, E. M.; SANTOS, I. A.. Medidas de resistividade elétrica DC em sólidos: como efetuá-las corretamente. **Química Nova**, São Paulo, v. 25, n. 4, p.639-647, 4 jul. 2002. ISSN 0100-4042. doi: 10.1590/S0100-40422002000400019.
- GONZALEZ, J. J. et al. The influence of iron vapour on an argon transferred arc. **Iopscience:** Plasma Sources Science and Technology, [s. L.], v. 6, n. 1, p.20-28, fev. 1997. doi: 10.1088/0963-0252/6/1/004.
- GRIEM, H. R.. **Principles of Plasma Spectroscopy.** Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- GRIFFITHS, D. J.. **Introduction to quantum mechanics.** Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1994. ISBN 0-13-124405-1.
- GUILE, A. E.. **Arc cathode and anode phenomena.** Annual Assembly of the International Institute of Welding, 1970
- HAYT JÚNIOR, W.; BUCK, J.a.. **Eletromagnetismo.** 7. ed. Rio de Janeiro: McGraw-hill Interamericana, 2009.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.. **Fundamentos de transferência de calor e massa.** 5. ed. Rio de Janeiro: Ltc – Livros Técnicos e Científicos Editora S.a, 2003. 698 p.

LANCASTER, J. F.. The physics of fusion welding – Part 1: The electric arc in welding. **Electric Power Applications:** IEE Proceedings B , [s. L.], v. 134, n. 5, p.233-254, set. 1987. doi: 10.1049/ip-b:19870040.

LANCASTER, J.F. **The Physics of Welding.** Pergamon Press & IIW, 1986. 340 p.

LEACH, S. L., Electric arc plasma steam generation. Patente nos Estados Unidos, Número: 4772775, 1988, <<http://www.freepatentsonline.com/4772775.html>>

LENIVKIN V. A., DIURGEROV N. G., PETROV P. I., VARUHA E. N., 1978 **Welding wire covering Influence on the MIG/MAG welding arc technological properties.** Svar. Proizv., no. 5, pp. 8-10.

LENIVKIN V. A., DIURGEROV N. G., SAGIROV Kh. N., 1989 **Technological properties of the MIG/MAG welding arc.** Mashinostrojenije, Moscow, 264 p.

LU, F. et al. Numerical simulation on interaction between TIG welding arc and weld pool. **Computational Materials Science**, [s. L.], v. 35, n. 4, p.458-465, abr. 2006. ISSN 0927-0256, DOI: 10.1016/j.commatsci.2005.03.014.

MENDONÇA, D. S.; ALFARO, S. C. A.; A BORGES, G.. U. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, São Paulo, v. 3, n. 3, p.1-6, jan. 2007.

MODENESI, P. J. & MARQUES, P. V., 2009 **Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais** UFMG Departamento de Engenharia Metalúrgica – Belo Horizonte –MG.

MURPHY, A. B. et al. Modelling of thermal plasmas for arc welding: the role of the shielding gas properties and of metal vapour. **Iopscience: Journal of Physics D: Applied Physics**, [s. L.], v. 42, n. 19, p.1-20, 18 set. 2009. doi: 10.1088/0022-3727/42/19/194006.

MURPHY, A. B.. Metal vapour in atmospheric-pressure arcs. **Iopscience: Journal of Physics D: Applied Physics**, [s. L.], v. 43, n. 43, p.20-28, 15 jun. 2010a. doi: 10.1088/0022-3727/43/43/430301.

MURPHY, A. B.. The effects of metal vapour in arc welding. **Iopscience: Journal of Physics D: Applied Physics**, [s. L.], v. 43, n. 43, p.1-31, 14 out. 2010b. doi: 10.1088/0022-3727/43/43/434001.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Data Sheet NI USB-6008, NI USB-6009.** Disponível em: <<http://www.ni.com/pdf/products/us/20043762301101dlr.pdf>>. Acesso em: 14 fev. 2011.

NIST, **National Institute of Standards and Technology.** Acessado em 07 de Fevereiro de 2011. <http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html>

OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C.. **Engenharia de Soldagem e Aplicações.** Rio de Janeiro: Ltc – Livros Técnicos e Científicos Editora S.a, 1982. 461 p.

OLIVEIRA, M. A.. **Desenvolvimento do processo de soldagem híbrido Plasma-MIG para operações de soldagem e brasagem.** 2006. 148 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianopolis, 2006.

PFENDER, E.; VEPREK, S.. Obituary for Professor Heinz Maecker. **Plasma Chemistry And Plasma Processing**, [new York], v. 20, n. 2, p.277-278, jun. 2000. Homenagem feita pelos editores, Doi: 10.1023/A:1017213008613.

PONOMAREV V., AL-ERHAYEM O., APPS R. L., LINDBERG B., **Arc welding process statistical analysis – Methodical approaches, analysis conceptions, experiences, experiences**, 1^a ed. em Inglês, Denmark, JOM-Institute, DTU-Helsingør, 158p.

QUIGLEY, M. B. C. et al. Heat flow to the workpiece from a TIG welding arc. **Iopscience**: Journal of Physics D: Applied Physics, [s. L.], v. 6, n. 18, p.2250-2258, 5 dez. 1973. doi: 10.1088/0022-3727/6/18/310.

RAZAFINIMANANA, M. et al. Experimental study of the influence of anode ablation on the characteristics of an argon transferred arc. **Iopscience**: Plasma Sources Science and Technology, [s. L.], v. 4, n. 3, p.501-510, ago. 1995. doi: 10.1088/0963-0252/4/3/021.

REIS, R.; SCOTTI, A.. **Fundamentos e prática da soldagem a plasma.** São Paulo: Artliber Editora, 2007. 147 p. ISBN 978-85-88098-39-8.

RESENDE, A. A.. **UMA CONTRIBUIÇÃO À ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM DO PROCESSO PLASMA-MIG COM ELETRODOS CONCÉNTRICOS.** 2009. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

RICHARDSON, I. M.. **Hyperbaric plasma welding.** 1991. Tese (Doutorado) - Cranfield Institute Of Technology, Bedfordshire, 1991.

SANTANA, I. J.. **Modelamento Matemático do processo de soldagem GMAW.** 2010. 167 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

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, [s. L.], v. 43, n. 2, p.1-5, 20 jan. 2010. doi: 10.1088/0022-3727/43/2/022001.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V.. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho.** São Paulo: Artliber Editora, 2008. 284 p.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V.; COSTA, A. V.. A methodology for voltage drop determination in GMA welding: arcs with short-circuiting metal transfer. **The**

European Physical Journal Applied Physics, Cambridge, v. 34, n. 3, p.231-236, jun. 2006. doi: 10.1051/epjap:2006060.

SOUZA, D.. **Levantamento de mapas operacionais de transferência metálica para soldagem MIG/MAG de aço ao carbono na posição plana.** 2010. 280 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

SOUZA, D.; RESENDE, A. A.; SCOTTI, A.. Um modelo qualitativo para explicar a influência da polaridade na taxa de fusão no processo MIG/MAG. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v. 14, n. 3, p.192-198, set. 2009. ISSN 0104-9224. doi: 10.1590/S0104-92242009000300002.

SPECTRAL PRODUCTS. **SM242 Hand-held CCD Spectrometer**. Disponível em: <<http://www.spectralproducts.com/catalog/pdf/SM242.pdf>>. Acesso em: 14 fev. 2011.

TAKAHASHI, Y.; KIHARA, H.; ABE, K.. The effects of radiative heat transfer in arc-heated nonequilibrium flow simulation. **Iopscience: Journal of Physics D: Applied Physics**, [s. L.], v. 43, n. 18, p.1-13, 12 maio 2010. doi: 10.1088/0022-3727/43/18/185201.

TERASAKI, H.; SIMPSON, S. W.. Modelling of the GMAW system in free flight and short circuiting transfer. **Science And Technology Of Welding & Joining**, [s. L.], v. 10, n. 1, p.120-124, fev. 2005.

THE PHYSICS HYPERTEXTBOOK Disponível em: <<http://hypertextbook.com>>. Acesso em: 7 jan. 2011.

TOPCHIY Ju. K., KAMENEV V. A., DIURGEROV N. G., LENIVKIN V. A., 1973 Sondagem axial do arco entre os eletrodos consumíveis. **Avtomat. Svarka**, no. 11, pp. 26-27.

VACQUIE, Serge. Influence of metal vapours on arc properties. **Pure And Applied Chemistry**, [s. L.], v. 68, n. 5, p.1133-1136, maio 1996.

VEKLICH, A. N.; BABICH, I. L.. Plasma of electric arc discharge between melted electrodes. **Czechoslovak Journal Of Physics**, [praga], v. 51, n. 1, p.23-26, 2001.

VILARINHO, L. O.. O arco TIG a 100 A e argônio puro é um arco especial? **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v. 14, n. 4, p.353-357, dez. 2009.

VILARINHO, L. O.; SCOTTI, A.. Proposal for a modified Fowler-Milne method to determine the temperature profile in TIG welding at low currents. **J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng.**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 1, p.34-39, mar. 2004.