

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA**

Mateus Barancelli Schwedersky

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO TIG DUPLO
ELETRODO**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica da Universidade Federal
de Santa Catarina para a obtenção do Grau de
Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Jair Carlos Dutra

Co-Orientador: Prof. Dr. Uwe Reisgen

Florianópolis
2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Schwedersky, Mateus Barancelli
Estudo e Desenvolvimento do Processo TIG Duplo Eletrodo
/ Mateus Barancelli Schwedersky ; orientador, Jair Carlos
Dutra ; coorientador, Uwe Reisgen. - Florianópolis, SC,
2015.
192 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica.


Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. TIG Duplo Eletrodo. 3.
Pressão do Arco. 4. Soldagem de elevada produtividade. 5.
Schlieren. I. Dutra, Jair Carlos. II. Reisgen, Uwe. III.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Mateus Barancelli Schwedersky


**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO TIG DUPLO
ELETRÓDO**

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Mecânica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.
Florianópolis, 11 de Setembro de 2015




Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.
Coordenador do curso

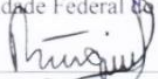
Banca examinadora:



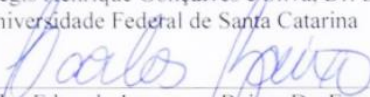
Prof. Jair Carlos Dutra, Dr. Eng.
Orientador



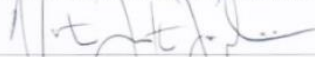
Prof. Jesualdo Pereira Farias, Dr. Eng.
Universidade Federal do Ceará



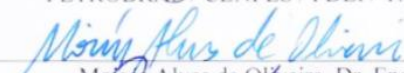
Prof. Régis Henrique Gonçalves e Silva, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina



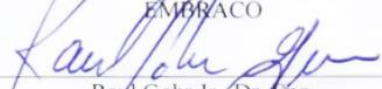
Carlos Eduardo Iconomos Bajxo, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina



Norton Zanette Kejelin, Dr. Eng.
PETROBRAS / CENPES / PDEP/ TMEC



Moses Alves de Oliveira, Dr. Eng.
EMBRACO



Raul Gohr Jr., Dr. Eng.
IMC-SOLDAGEM

Dedico este trabalho aos meus pais, Werner e Rosa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que colaboraram de alguma forma para a realização deste trabalho:

- Ao Prof. Jair Carlos Dutra pela orientação neste trabalho, e também pelo exemplo de dedicação e persistência ao longo de várias décadas, que resultaram na criação e consolidação do LABSOLDA-UFSC.

- A todos os Professores do Dep. de Eng. Mecânica que contribuíram na minha formação acadêmica, profissional e pessoal, em especial ao Prof. Berend Snoeijer.

- Ao CNPq e CAPES, pelas bolsas de estudo. Ao LABSOLDA e empresas IMC e SPS que ajudaram a financiar este trabalho.

- Ao Dr. Eng. Raul Gohr Jr. que forneceu apoio no desenvolvimento das fontes de soldagem e é um dos grandes responsáveis pela viabilidade técnica de realização de um trabalho como este.

- A todos os colegas do LABSOLDA, em especial ao Prof. Régis H. Gonçalves e Silva, e ao M. Eng. Cleber Marques por suas fundamentais atuações no laboratório; aos bolsistas de graduação que contribuíram diretamente em diferentes etapas: Michel B. Birolo, Édy A. Martins e Flávio G. Berka. Ao projetista João Facco de Andrade que contribuiu no projeto das tochas desenvolvidas. Aos demais colaboradores Marcelo Okuyama, Fernando Costenaro e Ricardo Campagnin por diversas contribuições. Ao Eng. Luciano Cirino que contribuiu de maneira importante em diversas discussões proveitosas que ajudaram a melhorar este trabalho.

- A toda minha família, principalmente meus pais Werner e Rosa que são os responsáveis por todas as oportunidades que resultaram na minha formação, e aos meus irmãos Maurício e Bernardo.

-Ich bedanke mich an alle Leute von Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik (ISF) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. Herrn Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisgen, dem Direktor des Institutes, danke ich für die wertvolle Gelegenheit, an seinem Institut ein sehr wichtiges Teil dieser Arbeit durchzuführen. Meinen besonderen Dank für Herrn Dipl.-Ing. Konrad Willms für alle Hilfe, die die Arbeit ermöglichten. Weiterhin möchte ich mich bei alle Assistenten und Mitarbeiter, besonderes Guido Buchholz, Marion Purrio, Philipp Lozano, Matthias Angerhausen, Jens de Vries, Chika Koyama, Alexandros Pipinikas, Xhafer Rexhepaj und Rahul Scharma für ihre freundschaftliche Unterstützung bedanken.

“Nunca se achar melhor ou pior do que ninguém. Ser humilde sempre.
Nós todos somos iguais, o que nos diferencia é a vontade de realizar os
nossos desejos. No futebol ou na vida nunca chegaremos a lugar nenhum
sozinhos. Precisamos sempre dos amigos ou colegas para chegar no
objetivo.”

(Mensagem que Fernandão, eterno capitão colorado falecido em um acidente de helicóptero em
2014, escreveu para seu filho)

RESUMO

O presente trabalho trata da pesquisa e desenvolvimento do processo TIG Duplo Eletrodo, modalidade investigada pela primeira vez em um trabalho acadêmico realizado em território nacional, e que mesmo internacionalmente é restrita a poucos grupos de pesquisa. O objetivo geral do trabalho realizado estava inserido no contexto do desenvolvimento de tecnologias de soldagem de alta produtividade usando o processo TIG, o qual possui grande potencial para redução de custos e diminuição do impacto ambiental se for usado em substituição ao MIG/MAG em diferentes aplicações. O resultado mais impactante foi o desenvolvimento de um primeiro sistema de soldagem nacional (tochas e fonte de soldagem) com adequada capacidade de operar com o processo duplo eletrodo, permitindo inclusive a utilização de intensidade de corrente total de até 900 A, e a prospecção de aplicações de elevada produtividade. Os equipamentos desenvolvidos proporcionaram a flexibilidade necessária para viabilizar o estudo dos principais aspectos do processo, usando combinações distintas de posicionamento entre os eletrodos para caracterizar a morfologia do arco em diferentes condições. Um dos principais aspectos abordados foi o desvio do arco causado pela interação dos campos magnéticos formados em cada eletrodo e que varia de intensidade conforme é modificado o afastamento entre os eletrodos. Em determinadas condições, esse desvio resulta em um fluxo de plasma em direção contrária à peça causando efeitos prejudiciais como forte instabilidade e aquecimento excessivo da tocha. Esses problemas podem ser evitados usando a técnica de pulsação sincronizada fora de fase ou utilizando pequenas distâncias entre as pontas dos eletrodos. Foi constatada uma considerável influência da velocidade de soldagem na morfologia do arco, causando ainda grande diferença nos valores de queda de tensão em cada eletrodo. Foram realizados ensaios de medição da pressão de estagnação do arco com diferentes distâncias entre os eletrodos, mostrando que o processo duplo eletrodo resulta em pressão do arco muito menor do que o processo convencional para a mesma corrente média total. Adicionalmente, foram executadas medições mostrando a influência da geometria de afiação do eletrodo em tronco de cone e a variação na pressão do arco utilizando 5% de hidrogênio misturado ao argônio. Os ensaios tipo cordão sobre chapa realizados mostraram que o processo TIG duplo eletrodo apresenta menor susceptibilidade à formação de defeitos tipo *humping* na soldagem de elevada velocidade. O processo foi testado em soldagem de chapas em junta sobreposta, obtendo velocidade de até 1,2

m/min, que significa o aumento da velocidade em 50% em comparação com o processo TIG convencional utilizando argônio puro.

Palavras-chave: TIG duplo eletrodo, soldagem de elevada velocidade, pressão de estagnação do arco.

ABSTRACT

This thesis deals with the research and development of the double electrode GTAW process, modality investigated for the first time in an academic work in Brazil, and even internationally is until yet restricted to a few research groups. The main objective of this work was inserted in a project of high productivity welding technologies development using the TIG process, which has great potential for cost savings and reduced environmental impact if used to replace the MIG / MAG in different applications. The most significant result was the development of a complete welding system (torches and welding power source) that allowed operating with the double electrode process adequately. It has enabled the use of total current intensity of up to 900 A, that is important for prospecting high productivity applications. The developed equipment provided the necessary flexibility to enable the study of the most relevant aspects of the process, using different combinations of positioning between the electrodes in order to characterize the arc morphology in different conditions. One of the main issues addressed was the arc deviation caused by the interaction of the magnetic fields from the arc of each electrode. This deviation assumes different intensities depending on the distance and positioning between the electrodes. In some situations, this deviation results in an unwanted plasma flux toward the welding torch that produces harmful effects as strong instability and torch overheating. These problems can be avoided by using the synchronized out of phase pulse technique or using small distances between the electrodes. It was noticed a considerable influence on the welding speed at the arc morphology, also causing significant difference in voltage drop values at each electrode. Measurements of the arc stagnation pressure were conducted using different distances between the electrodes. The results showed that the double electrode method presents much lower arc pressure than the conventional process, for the same total average current. Furthermore, arc pressure measurements were performed showing the influence of the truncated sharpening geometry of the electrode, and the use of 5% hydrogen in the argon on the shielding gas. Bead on plate test were carried out showing that the double electrode GTAW has lower susceptibility to the humping defects formation in high speed welding. The process was also tested welding mild-steel plates in lap joint, reaching welding velocity up to 1.2 m/min using argon at shielding gas, which means 50% increasing at the speed, comparing with conventional GTAW.

Keywords: *Double electrode GTAW, high-speed welding, arc stagnation pressure.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Soldagem realizada com o processo TIG utilizando a técnica <i>keyhole</i> em chapa de aço com 6,35 mm de espessura [2]	36
Figura 2 - Soldagem realizada com o processo TIG com velocidade de 1,5 m/min sem necessidade de material de adição [1]	37
Figura 3 - Aspecto típico de um cordão sobre chapa feito com o processo TIG usando corrente elevada mostrando duas seções transversais [1]	39
Figura 4 - Aspecto da formação de defeitos tipo <i>humping</i> em soldagem de chapas de aço carbono 3mm de espessura em junta sobreposta utilizando o processo TIG.....	39
Figura 5 -Efeito do gás de proteção na velocidade limite para aparecimento de defeitos [3]	40
Figura 6 – Quantidade de metal fundido utilizando o processo TIG para os diferentes gases (DEP 3 mm) [1].....	42
Figura 7 – (a) Campo magnético B gerado pela densidade de corrente J. As flechas em direção ao centro representam a força de Lorentz $J \times B$. (b) Arco divergente [10].....	45
Figura 8 - Representação didática do aparato usado para medição da pressão de estagnação do arco para o processo TIG. 1- Base de cobre refrigerada; 2- Furo passante; 3- Duto ou sistema de comunicação entre o furo e o sensor; 4- Sensor medidor de pressão e sistema de aquisição dos dados. (Adaptado de [12])	46
Figura 9 – Resultados de ensaio de medição de pressão de estagnação do arco usando os mesmos parâmetros de soldagem, porém utilizando diferentes diâmetros no orifício de medição [13]	47
Figura 10 - Comparação da pressão de estagnação do arco TIG usando He e Ar. Gráfico da esquerda feito por Lin e Eagar [10]. Gráfico da direita feito por Campbell et al. [14] para a corrente de 200 A	48
Figura 11 - Resultados de medição de pressão de estagnação do arco TIG com diferentes correntes. Gráfico esquerda: Fan e Shi [12] DEP 6,3mm; Diâmetro do eletrodo 3,2 mm; Ang. de afiação eletrodo 60°. Gráfico direita: Lin e Eagar [10].....	49
Figura 12 - Pressão de estagnação do arco TIG de acordo com o ângulo de afiação do eletrodo. Gráfico esquerda: Fan e Shi [12], Ar puro, 200 A, DEP 6,3 mm. Gráfico direita: Lin e Eagar [10], Ar puro, DEP 8 mm	49
Figura 13 - Variação da pressão do arco no processo TIG de acordo com a utilização de diferentes DEP. Gráfico esquerda: Fan e Shi [12]: Ar puro, 200 A, afiação do eletrodo com ponta em 60°. Gráfico direita: Lin e Eagar [10]	50

Figura 14 - Pontos de solda TIG mostrando a possibilidade de deformação do morfologia do arco usando campo magnético externo [17].....	51
Figura 15 - Resultados de Nomura et al. [17] mostrando que a manipulação do arco TIG usando campo magnético externo possibilitou aumentar a velocidade de soldagem sem formação de <i>humping</i> de 100 para 180 cm/min	52
Figura 16 - Sistema de soldagem que utiliza 3 tochas TIG em sequência, utilizado para fabricação de tubos com costura. Fonte: www.ledica.it [18]	53
Figura 17 -Desenho esquemático representando o processo TIG duplo eletrodo	54
Figura 18 –Força produzida em uma carga elétrica positiva se movendo por um campo magnético. Adaptado do trabalho de Reis [19]	55
Figura 19 - Diagrama explicando a atração de dois arcos de mesma polaridade. Adaptado de Reis [19].....	57
Figura 20 - Tocha de soldagem TIG duplo eletrodo utilizada por Kobayashi et al. [20].....	59
Figura 21 - Resultados de medição de pressão de estagnação, comparando o TIG-DE com o processo de eletrodo único [20]	60
Figura 22 - Perfil de distribuição da pressão do arco. Esquerda: TIG convencional. Direita: Processo duplo eletrodo [20]	60
Figura 23 - Aspecto do arco para o processo convencional (esquerda), e para o processo TIG-DE (direita), utilizando a mesma quantidade total de corrente [21].....	61
Figura 24 – Resultados de medições mostrando a distribuição da pressão de estagnação do arco com diferentes correntes de soldagem (DEP: 3 mm, Gás: Ar). Fonte: [23] Esquerda: TIG convencional. Direita: TIG-DE com 4 mm de afastamento entre os eletrodos. (Atenção para as diferentes escalas dos gráficos).....	62
Figura 25 - Resultados mostrando a distribuição da pressão de estagnação do arco com diferentes DEP usando 200 A de corrente total. Fonte: [23] Esquerda: TIG convencional. Direita: TIG-DE com 4 mm de afastamento entre os eletrodos. (Atenção para as diferentes escalas dos gráficos).....	62
Figura 26 - (a) Resultados de distribuição da pressão de estagnação do arco TIG-DE com diferentes distâncias entre os eletrodos para corrente total de 200 A. [23] (b) Comparação da tensão do arco em cada eletrodo para os processos TIG convencional e duplo eletrodo, Gás: Ar, DEP: 3 mm [22]	63

Figura 27 - Resultados de soldagem mostrando melhor desempenho do TIG-DE (cordões (b) e (d)) em comparação com o processo convencional (cordões (a) e (c)) [22].....	64
Figura 28 – Simulação da influência no afastamento do eletrodo na temperatura e velocidade e direção do fluxo de plasma para o processo TIG-DE. [26] (DEP: 3 mm, Gás: Ar, I: 100 A cada eletrodo).....	65
Figura 29 - Perfis de distribuição de densidade de calor imposto calculados para o TIG-DE com diferentes espaçamentos entre a ponta dos eletrodos. [24] (DEP: 3 mm, Gás: Ar, I: 100 A cada eletrodo).....	66
Figura 30 - Valor máximo da densidade de calor imposto calculados para o TIG-DE com diferentes espaçamentos entre a ponta dos eletrodos. [26] (DEP: 3 mm, Gás: Ar, I: 100 A cada eletrodo).....	66
Figura 31 - Perfis de distribuição de pressão do arco calculados para o TIG-DE com diferentes espaçamentos entre a ponta dos eletrodos. [24] (DEP: 3 mm, Gás: Ar, I: 100 A cada eletrodo).....	67
Figura 32 - Valor da pressão máxima do arco para o processo TIG-DE com diferentes distâncias entre os eletrodos, calculado por Ogino et al. (DEP: 3 mm, Gás: Ar). Gráfico da esquerda [24]. Gráfico da direita [26].....	67
Figura 33 - Valor do calor aportado total para o processo TIG-DE com diferentes distâncias entre os eletrodos, calculado por Ogino et al. (DEP: 3 mm, Gás: Ar). Gráfico da esquerda [24]. Gráfico da direita [26].....	68
Figura 34 - Análise por simulação numérica do processo TIG-DE realizado por Wang et al. [27] Figuras (a), (b) e (c): Direção, velocidade e temperatura do plasma, sendo em (a) o corte no eixo xz, em (b) o corte no eixo yz e em (c) a vista superior em corte 0,15 mm a cima da superfície do ânodo. Figura (d): Densidade de corrente.....	69
Figura 35 - Imagem de um sistema TIG-DE desenvolvido para operações de revestimento. Fonte: [28].....	70
Figura 36 - Imagem dos primeiros ensaios realizados para o estudo do processo TIG-DE [29].....	73
Figura 37 - Desvio magnético do arco nos ensaios realizados com duas tochas de soldagem TIG posicionadas com 13 mm de afastamento entre os eletrodos. Esquerda: 100 A em cada eletrodo. Direita: 200 A em cada eletrodo. [29].....	73
Figura 38 - Tentativa de utilizar um aparato externo para diminuir o desvio do arco no processo TIG duplo eletrodo. [29].....	74
Figura 39 – Renderização com transparência dos componentes mostrando o projeto da primeira versão de tocha TIG duplo eletrodo projetada pelo LABSOLDA-UFSC.....	76

Figura 40 – Imagens da primeira versão de tocha TIG duplo eletrodo projetada e construída pelo LABSOLDA-UFSC.....	77
Figura 41 - Fonte de soldagem IMC Digiplus A7 em versão desenvolvida para o processo TIG duplo eletrodo em parceria com o LABSOLDA-UFSC	79
Figura 42 - Janelas de regulagem de parâmetros da fonte IMC Diplus A7 versão TIG Duplo Eletrodo.....	81
Figura 43 - Sequência de imagens (sequência cronológica) mostrando o desvio do arco no processo TIG-DE, que ocasionou a formação de um arco duplo. (Corrente: 200 A em cada eletrodo. Gás de proteção: Argônio. Velocidade de soldagem: 0,5 m/min. Metal de base: Aço carbono. Tempo de exposição da imagem de 1/3 s. Sentido de deslocamento em todas imagens ←).....	83
Figura 44 - Aspecto do arco formado com TIG duplo eletrodo com afastamento de 4 mm entre as pontas dos eletrodos. (I: 200 A em cada eletrodo; Gás de proteção: Ar; Velocidade de soldagem: 0,5 m/min; Metal de base: Aço carbono; Tempo de exposição da imagem de 1/3 s; Sentido de deslocamento ←)	84
Figura 45 – Aspecto do arco do TIG-DE onde o eletrodo da direita está no período de pulso com 350 A, o eletrodo da esquerda está no período de base com 50 A. (Tempo de exposição da imagem de 0,05 s; Sentido de deslocamento ←)	85
Figura 46 - Comparação do desvio do arco entre a técnica convencional com 200 A de corrente constante em cada eletrodo (imagens “a” e “c”), e a técnica pulsado sincronizado fora de fase com 350 A no pulso e 50 A na base, e 0,1 s de t_p e t_b (imagens “b” e “d”). (Distância entre os eletrodos: 8 mm (a e b) 12 mm (c e d); Tempo de exposição das imagens 1/3 s; Gás de proteção: Ar; Vs: 0,5 m/min; Metal de base: Aço carbono; Sentido de deslocamento ←)	86
Figura 47 - Oscilograma de corrente mostrando a diferença nos tempos de subida e descida da corrente	87
Figura 48 – Oscilogramas da corrente para o processo TIG-DE usando a técnica pulsado sincronizado fora de fase com 300 A de corrente de pulso e 30 A de corrente de base e diferentes frequências de pulsação: (a) 2,5 Hz (b) 25 Hz (c) 250 Hz	88
Figura 49 – Imagens do arco usando o processo TIG-DE com a técnica pulsado sincronizado fora de fase com 300 A de corrente de pulso e 30 A de corrente de base e diferentes frequências de pulsação: (a) 2,5 Hz (b) 25 Hz (c) 250 Hz. Tempo de exposição de cada imagem: 0,4 s	89

Figura 50 - Ensaio de soldagem tipo cordão sobre chapa com diferentes velocidades no mesmo cordão. Imagem superior: Processo TIG convencional com 300 A. Imagem inferior: Processo TIG-DE, com 4 mm de distância entre a ponta dos eletrodos e corrente de soldagem de 200 A em cada eletrodo.....	91
Figura 51 – Imagem mostrando a fixação do corpo de prova na mesa de soldagem utilizado nos ensaios cordão sobre chapa.....	92
Figura 52 - Desenhos esquemáticos mostrando as 4 posições padrão para cada eletrodo na 2ª versão de tocha de soldagem TIG-DE desenvolvida	93
Figura 53 - Imagens da simulação numérica do fluxo de gás feita durante o projeto da tocha TIG-DE para comparar duas concepções diferentes do difusor de gás.....	95
Figura 54 - Imagens da segunda versão de tocha TIG duplo eletrodo desenvolvida e fabricada em parceria entre o LABSOLDA-UFSC e o ISF-RWTH-Aachen.....	98
Figura 55 - Imagens da segunda versão de tocha TIG duplo eletrodo desenvolvida e fabricada em parceria entre o LABSOLDA-UFSC e o ISF-RWTH-Aachen.....	99
Figura 56 - Imagem da bancada de soldagem TIG duplo eletrodo no ISF-RWTH-Aachen.....	101
Figura 57 – Módulos de aquisição utilizados para fazer o sistema de aquisição de dados e comando da mesa de soldagem.....	102
Figura 58 - Efeito do filtro analógico do sinal de tensão. Em verde o sinal original, e em vermelho o sinal filtrado.....	103
Figura 59 - Módulo eletrônico construído para isolar os sinais de tensão durante os pulsos de alta frequência da abertura do arco.....	104
Figura 60 - Tela do programa feito em LabVIEW utilizado para aquisição dos sinais de corrente e tensão, e controle da velocidade de soldagem.	105
Figura 61 - Imagens do arco com diferentes ângulos de afiação dos eletrodos. (Vs: 0,4 m/min. DEP: 3 mm. Imagens da coluna central: 200 A em cada eletrodo. Imagens da coluna à direita: pulsado sincronizado fora de fase com Ip: 370 A, Ib: 30 A e tp e tb: 0,1s. Tempo de exposição da imagem: 0,2 s)	107
Figura 62 - Aspecto do arco utilizando eletrodo afiado com ângulo de 20° no processo TIG duplo eletrodo. (Vs: 0,4 m/min. DEP: 3 mm. (a): 200 A (corrente constante) em cada eletrodo. (b): Pulsado sincronizado fora de fase com Ip: 370 A, Ib: 30 A e tp=tb: 0,1s. (c): 350 A (corrente constante) em cada eletrodo. Tempo de exposição das imagens: 0,2 s).....	108
Figura 63 - Desenho esquemático mostrando o aparato experimental utilizado para medição da pressão de estagnação do arco	109

Figura 64 - Aparato de medição de pressão do arco. (a): Tocha duplo eletrodo posicionada sobre o aparato de medição. (b): Imagem mostrando a tocha sem o bocal de gás de proteção permitindo visualizar os eletrodos e o orifício de medição.....	110
Figura 65 - Equipamentos utilizados para as medições de pressão de estagnação. (a): Sensor de pressão utilizado. (b): Registrador de dados	112
Figura 66 - Figura esquemática mostrando a movimentação da tocha de soldagem em torno do orifício de medição durante os ensaios de medição da pressão de estagnação do arco.....	113
Figura 67 - Procedimento de aferição utilizando relógio comparador para verificar se os sistemas utilizados para movimentação estavam adequados	114
Figura 68 - Gráfico mostrando o resultado das 3 medições diferentes realizadas para a mesma condição experimental	115
Figura 69 – Gráficos de pressão de estagnação do arco para o processo TIG duplo eletrodo utilizando diferentes afastamentos entre os eletrodos....	117
Figura 70 - Vista superior da distribuição de pressão com diferentes afastamentos entre os eletrodos. (a) 0,5 mm; (b) 2 mm; (c) 4 mm e (d) 6 mm	118
Figura 71 - Resultados da medição de pressão de estagnação para o processo TIG-DE utilizando diferentes distâncias entre os eletrodos....	119
Figura 72 - Resultados da medição de pressão de estagnação para o processo TIG-DE utilizando diferentes distâncias entre os eletrodos em comparação com o processo TIG convencional	121
Figura 73 - Morfologia do arco para o processo TIG duplo eletrodo com diferentes afastamentos entre os eletrodos.....	123
Figura 74 - Eletrodos utilizados para medição da pressão de estagnação do arco para comparar o efeito da afiação em tronco de cone.....	124
Figura 75 - Gráficos mostrando os resultados das medições de distribuição da pressão de estagnação do arco utilizando eletrodos com afiação normal (eletrodo pontiagudo), e afiação com tronco de cone com diâmetros 1 e 2 mm	125
Figura 76 - Gráficos mostrando os resultados das medições da pressão de estagnação do arco utilizando eletrodos com afiação normal (eletrodo pontiagudo), e afiação com tronco de cone com diâmetros 1 e 2 mm (DEP 3 mm; gás Ar)	125
Figura 77 - Resultados da medição de pressão de estagnação do arco para o processo TIG comparando a utilização de argônio puro e de uma mistura com 5% de H ₂	126

Figura 78 - Chapa de cobre utilizada para realização da filmagem em alta velocidade para caracterizar o comportamento do arco.....	128
Figura 79 – Imagens da morfologia do arco e tensão média em cada eletrodo para o processo TIG-DE com diferentes correntes e diferentes distâncias entre os eletrodos (a distância nas imagens da 1ª linha da figura foi 0,5 mm, na 2ª linha foi 2 mm, na 3ª linha foi 4 mm, e na 4ª linha foi 5,5 mm; Velocidade de soldagem 0,6 m/min; Sentido de soldagem ←).....	129
Figura 80 – Sinais de tensão de cada eletrodo e imagens do aspecto do arco nos diferentes momentos do ensaio realizado mudando a direção de movimentação com o processo TIG duplo eletrodo. (Corrente em cada eletrodo: 200 A, Vs: 0,6 m/min).....	134
Figura 81 - Sinais de tensão de cada eletrodo e imagens do aspecto do arco nos diferentes momentos do ensaio realizado mudando a direção de movimentação com o processo TIG duplo eletrodo. (Corrente em cada eletrodo: 200 A, Vs: 0,6 m/min).....	135
Figura 82 - Sinais de tensão de cada eletrodo e imagens do aspecto do arco nos diferentes momentos do ensaio com o processo TIG duplo eletrodo alterando a velocidade de movimentação. (Corrente em cada eletrodo: 300 A).....	136
Figura 83 - Corpo de prova posicionado para ensaio de soldagem tipo cordão sobre chapa	138
Figura 84 – Ensaio tipo cordão sobre chapa realizado com 3 trechos de velocidades diferentes, mostrando a formação de <i>humping</i> que ocorre quando se utiliza um eletrodo com ponta convencional (eletrodo pontiagudo).....	138
Figura 85 - Imagens do aspecto do cordão realizado com o TIG convencional e o TIG-DE com diferentes afastamentos entre os eletrodos	140
Figura 86 - Resultados da medição da área fundida comparando o TIG-DE com diferentes distâncias entre os eletrodos, como o processo TIG convencional.....	141
Figura 87 - Aspecto dos eletrodos após a realização de ensaio tipo cordão sobre chapa com o processo TIG-DE utilizando diferentes distâncias entre os eletrodos.....	143
Figura 88 - Imagens mostrando os corpos de prova para ensaio de soldagem em junta sobreposta. (a) corpos de prova ponteados. (b) corpos de prova fixados na mesa de soldagem	144
Figura 89 - Soldagem de chapas em junta sobreposta na posição horizontal	145

Figura 90 - Aspecto do cordão e oscilograma de tensão dos dois eletrodos de soldagem de chapas em junta sobreposta com velocidade de 1,2 m/min. Corrente em cada eletrodo: 350 A. Afastamento entre os eletrodos 5 mm	147
Figura 91 - Oscilograma de tensão da soldagem de chapas de aço em junta sobreposta utilizando o processo TIG-DE com velocidade de 1,2 m/min. (320 A em cada eletrodo. Afastamento entre os eletrodos: 2 mm).....	147
Figura 92 - Corpo de prova soldado usando o TIG-DE com 1,2 m/min. Gás: Ar puro. Corrente: 320 A em cada eletrodo.....	148
Figura 93 – Quadros da filmagem em alta velocidade do processo TIG-DE na soldagem de chapas de aço com 3,2 mm de espessura em junta sobreposta mostrando instabilidade do arco. (Tempo de exposição: 3 μ s. Vs: 1,2 m/min. Corrente em cada eletrodo: 320 A).....	149
Figura 94 - Imagens obtidas com filmagem de alta velocidade mostrando a soldagem de chapas de aço em junta sobreposta em (a) utilizando o processo TIG convencional, e em (b) utilizando o processo TIG-DE. (Tempo de exposição 3 μ s em (a) e 2 μ s em (b))	150
Figura 95 - Característica estática para o processo TIG usando argônio e DEP 2 mm. Levantamento realizado sobre ânodo de cobre refrigerado [34]	154
Figura 96 - Característica estática para o TIG. (a) Dados de Vilarinho [35] (DEP 5 mm, EWTh-2; 3,2 mm de diâmetro afiado em 60°, ensaios usando ânodo de cobre); (b) dados de Dutra (EWTh-2; 3,2 mm de diâmetro afiado em 30°, ensaios usando ânodo de aço) [36].....	155
Figura 97 - Comportamento observado na aquisição do sinal de tensão (eletrodo 4,8 mm de diâmetro EWTh-2, 400 A, DEP 3 mm, ensaio realizado sobre bloco de cobre refrigerado com água)	157
Figura 98 - Variação da tensão do arco para diferentes correntes utilizando diferentes tochas de soldagem e composição do eletrodo [2] (DEP 5 mm; Vs: 0,35 m/min; eletrodo de 6,4 mm de diâmetro afiado com 30°, ensaios realizados em aço carbono).....	160
Figura 99 - Afição dos eletrodos utilizados no ensaio de medição da característica estática do processo TIG.....	163
Figura 100 – Valores da tensão do arco para diferentes correntes no processo TIG com eletrodos usando diferentes afiações logo após a abertura do arco. (DEP 3 mm, gás argônio).....	164
Figura 101 - Característica estática do processo TIG com eletrodos usando diferentes afiações 35 s após a abertura do arco. (DEP 3 mm, gás argônio)	165

Figura 102 – Desenho esquemático mostrando a configuração conhecida como Sistema Toepler Modificado (configuração em Z), que foi utilizado para filmagens com a técnica Schlieren. Figura adaptada de [44].....	170
Figura 103 - Aparato experimental para visualização do fluxo de gás na tocha de soldagem TIG-DE utilizando a técnica <i>Schlieren</i>	172
Figura 104 - Bocais com diferentes geometrias para a tocha TIG-DE ..	173
Figura 105 - Exemplo de comparação mostrando o que seria o fluxo de gás em uma tocha TIG com e sem gás lens [45].....	174
Figura 106 - Imagem do fluxo de gás utilizando a técnica Schlieren obtida por pesquisadores da TU Dresden comparando diferentes vazões de gás de proteção no processo TIG. [47]	175
Figura 107 – Imagens obtidas com a técnica Schlieren comparando o fluxo de gás com os diferentes bocais. Gás utilizado CO ₂ . Vazão utilizada 10 l/min.....	177
Figura 108 - Imagem do fluxo de gás na tocha TIG-DE obtida pela técnica <i>Schlieren</i> filmando também diretamente o arco. Gás utilizado: Argônio 20 l/min.....	178
Figura 109 - Imagem do fluxo de gás na tocha TIG-DE obtida pela técnica <i>Schlieren</i> utilizando um anteparo na frente do arco. Gás utilizado: Argônio 20 l/min.....	178
Figura 110 - Imagem do fluxo de gás obtida usando a técnica Schlieren em uma tocha TIG convencional usando gás lens. Imagem obtida usando um anteparo em frente ao arco. Gás: Ar puro com 10 l/min.....	179

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOGIAS

Ar: gás argônio

AVC: Arc Voltage Control

AWS: American Welding Society

B: campo magnético

Ce: elemento Cério

CO₂: gás dióxido de carbono

DE-GTAW: Double Electrode-GTAW

DEP: Distância eletrodo-peça

DIN GS 0196: norma alemã

EWTh-2: Eletrodo de tungstênio dopado com 2% de óxido de tório

EWLa15: Eletrodo de tungstênio dopado com 1,5% de óxido de lantânio

F/9: um dos padrões de medida do diâmetro de abertura do diafragma de uma lente usada em fotografia

GTAW: processo de soldagem Gas Tungsten Arc Welding

H₂: gás hidrogênio

He: gás hélio

I: corrente de soldagem

IGBT: Insulated-Gate Bipolar Transistor

J: densidade de corrente

ISF: *Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik* (Instituto de pesquisa em soldagem e técnicas de união da Universidade RWTH-Alemanha)

La: elemento Lantânio

LABSOLDA: Laboratório de Soldagem da Universidade Federal de Santa Catarina

MIG/MAG: processo de soldagem Metal Inert Gas/ Metal Activ Gas

PAW: processo de soldagem Plasma Arc Welding

RC: resistor-capacitor (denominação usada em filtro analógico de sinais)

RWTH: *Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen* (Universidade técnica da cidade de Aachen na Alemanha)

SAP: Sistema Portátil de Aquisição de Dados de soldagem fabricado pela empresa IMC-Soldagem

SAW: processo de soldagem Submerged Arc Welding

TIG: processo de soldagem Tungsten Inert Gas

TIG-DE: Processo de soldagem variante do TIG que utiliza dois eletrodos posicionados em pequenas distâncias

Th: elemento tório

TTL: Transistor-transistor Logic

U: tensão do arco

UFSC: Universidade Federal de Santa Catarina

W: elemento tungstênio

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	29
2 OBJETIVOS	33
3 ASPECTOS RELEVANTES SOBRE A SOLDAGEM TIG DE ELEVADA PRODUTIVIDADE.....	35
3.1 INTRODUÇÃO À SOLDAGEM TIG DE ELEVADA PRODUTIVIDADE.....	35
3.2 FORMAÇÃO DE DEFEITOS NA SOLDAGEM TIG COM ELEVADA CORRENTE.....	38
3.3 PRESSÃO DO ARCO NA SOLDAGEM TIG.....	44
4 INTRODUÇÃO À SOLDAGEM TIG DUPLO ELETRODO.....	51
4.1 ORIGEM DA IDEIA	51
4.2 DEFINIÇÃO DO PROCESSO TIG DUPLO ELETRODO	53
4.3 DESVIO DO ARCO EM PROCESSOS COM DUPLO ELETRODO ...	54
4.4 REVISÃO DA LITERATURA SOBRE O PROCESSO TIG DUPLO ELETRODO	58
5 DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO TIG DUPLO ELETRODO.....	71
5.1. ENSAIOS PRELIMINARES	72
5.2 DESENVOLVIMENTO COM A 1ª VERSÃO DE TOCHA TIG DUPLO ELETRODO	75
5.2.1 Tocha de soldagem TIG-DE primeira versão.....	75
5.2.2 Fonte de soldagem TIG duplo eletrodo.....	77
5.2.3 Testes de soldagem.....	81
5.3 DESENVOLVIMENTO USANDO A 2ª VERSÃO DE TOCHA TIG DUPLO ELETRODO	92
5.3.1 Tocha de soldagem TIG-DE segunda versão.....	92
5.3.2 Bancada de ensaios ISF	100
5.3.3 Geometria de afiação dos eletrodos.....	105
5.3.4 Medição de pressão do arco para o processo TIG-DE.....	108
5.3.5 Medições de pressão do arco para o TIG convencional.....	123
5.3.6 Análise da morfologia do arco no TIG-DE em corrente e velocidade elevadas	127
5.3.7 Testes de soldagem tipo cordão sobre chapa usando TIG-DE.....	137
5.3.8 Testes de soldagem de chapas de aço em junta sobreposta utilizando o processo TIG-DE	143
6 CARACTERÍSTICA ESTÁTICA DO ELETRODO COM PONTA TRONCO DE CONE.....	153
6.1 REVISÃO E DISCUSSÃO SOBRE O TEMA.....	154
6.2 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS REALIZADOS	162
6.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	164

7 ENSAIOS COM A TÉCNICA SCHLIEREN	169
7.1 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS	169
7.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES	173
8 CONCLUSÕES.....	181
9 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	187
10 REFERÊNCIAS CITADAS.....	189

1. INTRODUÇÃO

A busca da melhoria de desempenho e redução de custos nos processos produtivos aplicados no setor industrial tem sido foco de pesquisa e desenvolvimento ao longo de toda a história da manufatura, e certamente continuará sendo um dos combustíveis a impulsionar o trabalho de pesquisadores em uma corrida que nunca alcançará um fim. Para os processos de soldagem, a necessidade de aumento de produtividade se mostra muito mais latente em comparação com os outros processos de fabricação, especialmente para a indústria brasileira, que em sua maioria tem base em operações manuais totalmente dependente dos soldadores. Principalmente nas indústrias de caldeiraria pesada, como o setor de petróleo e gás, e construção naval, os processos aplicados são ultrapassados tecnologicamente e é evidente o enorme potencial de aumento de produtividade e redução de custos que seria obtido caso fossem adotadas técnicas mais modernas.

De maneira contrária ao que se constata ser a realidade da indústria brasileira, o desenvolvimento da área de pesquisa em âmbito internacional, e disponibilidade de novos equipamentos e processos de soldagem tem experimentado um enorme desenvolvimento nos últimos 20 anos. Isso tem acontecido por meio do surgimento de uma grande quantidade de novas variantes dos processos. Se por muito tempo, nas universidades era possível ensinar e apreender que os processos de soldagem a arco eram o eletrodo revestido, arco submerso, TIG, MIG/MAG e Plasma, hoje tem-se, somente dentro da família do MIG/MAG, mais de uma dezena de sub-modalidades, em que a estratégia de controle de corrente permite obter os mais variados resultados. Além disso, contando com uma grande possibilidade de combinações, é enorme o leque de novos processos híbridos, os quais combinam dois ou mais processos. Todas essas possibilidades de novos processos de soldagem têm sido alavancadas principalmente pelo avanço da eletrônica nos equipamentos, que incorporam agora controles microprocessados, permitindo uma grande variedade de implementações de novas lógicas.

O presente trabalho está inserido nesse contexto após a intensificação de desenvolvimentos realizados no LABSOLDA, Instituto de Soldagem e Mecatrônica da Universidade Federal de Santa Catarina, em busca de soluções para o aumento da produtividade do processo TIG autógeno. Apesar do relativo sucesso neste objetivo, foram atingidos limites, que impuseram o surgimento de ideias inovadoras, as quais geraram novas frentes de ação do LABSOLDA. Uma destas frentes foi o desafio apresentado neste trabalho, o desenvolvimento do processo TIG

com duplo eletrodo, cujas bases de concepção foram idealizadas em 2009. De início os resultados dos testes com essa nova modalidade foram pouco satisfatórios, mas, apesar disso, foi dada continuidade nos desenvolvimentos, uma vez que não se poderia ficar com a dúvida do potencial do processo, estando-se dentro de uma instituição de pesquisa. A insistência em realizar essa pesquisa foi corroborada em 2013 quando no principal evento de tecnologia de soldagem do mundo, a feira “*Schweißen und Schneiden*” que acontece na cidade de Essen na Alemanha a cada 4 anos, uma empresa que é fabricante de alguns equipamentos mais modernos e robustos em nível mundial para soldagem automatizada apresentou um sistema usando exatamente a mesma variante do processo TIG que estava sendo desenvolvida no presente trabalho. O fato de que não foi possível alcançar o pioneirismo absoluto com relação a apresentação de um equipamento ou processo de nível industrial, não deixa de comprovar que o LABSOLDA-UFSC, mais uma vez, mesmo em condições muito desiguais de recursos financeiros em comparação com empresas e institutos internacionais, consegue, de fato, produzir trabalhos de vanguarda no desenvolvimento de processos e equipamentos de soldagem a arco.

O presente texto foi estruturado apresentando primeiramente os aspectos relevantes relativos à soldagem TIG de elevada produtividade, relatando a experiência de vários anos de pesquisa e desenvolvimentos com o tema. Foram abordados principalmente a formação dos defeitos de soldagem e o papel da pressão do arco na soldagem TIG. O capítulo seguinte mostra a análise e discussão das informações publicadas nos artigos científicos encontrados sobre o processo TIG Duplo Eletrodo. No Capítulo 5 estão registrados os desenvolvimentos realizados no âmbito do presente trabalho, seguindo uma ordem de apresentação conforme as diferentes versões de equipamentos foram concebidas e aplicadas para o estudo do processo. Entre os diferentes aspectos estudados, é possível destacar os experimentos para verificar a morfologia do arco e a queda de tensão em cada eletrodo nas diferentes situações operacionais. Medições da pressão de estagnação foram realizadas procurando entender a influência do afastamento dos eletrodos. Também foram realizadas medições de pressão de estagnação do arco usando o processo TIG convencional para verificar: o efeito da afiação truncada do eletrodo e a utilização de 5% de hidrogênio em mistura com o argônio no gás de proteção. Para avaliar o desempenho do processo TIG Duplo Eletrodo foram realizados ensaios tipo cordão sobre chapa e desenvolvidos procedimentos de soldagem de chapas de aço em junta sobreposta, que é um exemplo de junta bastante comum em aplicações industriais.

Adicionalmente ao estudo do processo TIG Duplo Eletrodo, foram apresentados dois capítulos que tratam de temas que possuem grande importância para a soldagem TIG de maneira geral. Um deles é o estudo da característica estática do processo TIG usando eletrodo com afiação em tronco de cone, a qual é frequentemente utilizada na soldagem com elevada corrente, mas que ainda não tinha recebido atenção em trabalhos científicos. O outro capítulo relata a experiência de utilização da técnica *Schlieren* para avaliar fluxo de gás de proteção em uma das tochas desenvolvidas, tema relevante considerando o histórico de projeto e construção de tochas de soldagem nos trabalhos realizados no LABSOLDA-UFSC.

O trabalho foi iniciado no LABSOLDA-UFSC, e teve parte importante dos desenvolvimentos realizados no ISF (*Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik*) da universidade RWTH em Aachen, durante a realização do período de doutorado *Sandwich*.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho está inserido em um contexto onde o objetivo amplo é a geração de bases científicas e tecnológicas para o desenvolvimento de opções e versões do processo TIG a fim de obtenção de soldagens produtivas ao nível do que pode ser obtido com o processo MIG/MAG, e ainda com um melhor apelo ecológico. Para tanto, é necessário, não somente ações na concepção que envolvem explorar o processo em sua modalidade convencional, mas também, o desenvolvimento de novas variantes, as quais visam expandir os limites de desempenho obtidos tradicionalmente. Nesse sentido, o trabalho trata de uma versão do processo TIG que utiliza dois eletrodos na mesma tocha de soldagem, modalidade essa que tem aparecido em artigos acadêmicos somente nos últimos anos, e não conta com equipamentos disponíveis comercialmente. Por se tratar de um trabalho pioneiro no Brasil e incluindo-se entre os pioneiros no mundo, não há a pretensão do alcance de sucesso tecnológico absoluto de maneira imediata, mas sim do delineamento de caminhos para tal. Dessa forma, o objetivo principal é criar a própria infraestrutura (tochas e fontes de soldagem), para que seja possível estudar e desenvolver o processo TIG duplo eletrodo no presente trabalho, e em trabalhos futuros.

Considerando a possibilidade de utilização do processo com diferentes faixas operacionais, o foco está direcionado inicialmente para as aplicações de alta produtividade, as quais englobam a utilização do processo em condições de elevada corrente (maior do que 300 A em cada eletrodo) e elevada velocidade de soldagem (maior do que 1 m/min). De acordo com a literatura, a grande limitação do aumento de produtividade do processo TIG é atribuída ao efeito de elevada pressão do arco em elevadas intensidades de corrente, que causa um tipo de defeito denominado *humping*. Por isso, um dos pontos investigados no presente trabalho é a pressão que o arco exerce sobre a poça de fusão, comparando a versão duplo eletrodo com diferentes configurações de processo ao TIG convencional.

Outro importante objeto de estudo é a interação magnética entre os dois arcos e sua influência na morfologia e estabilidade do arco resultante, influenciando o comportamento do processo de maneira geral de acordo com a posição relativa entre os eletrodos. O estudo desta interação tem por objetivo a criação de bases para o projeto de tochas, técnicas de controle de corrente e também para o direcionamento da aplicação desta nova versão do TIG.

Considerando a necessidade de avaliar o desempenho do novo processo em um exemplo de aplicação de soldagem de elevada produtividade típico para o setor industrial, também foi estabelecido como objetivo realizar o estudo e desenvolvimento de procedimentos de soldagem autógena de chapas de aço carbono com elevada velocidade usando o processo TIG duplo eletrodo.

3. ASPECTOS RELEVANTES SOBRE A SOLDAGEM TIG DE ELEVADA PRODUTIVIDADE

3.1. INTRODUÇÃO À SOLDAGEM TIG DE ELEVADA PRODUTIVIDADE

O tema soldagem TIG de elevada produtividade tem sido abordado pelo LABSOLDA-UFSC nos últimos anos, tendo sido gerados dois trabalhos de mestrado [1-2], e envolvido projetos de desenvolvimento em parceria com o setor industrial. A própria utilização do termo elevada produtividade ao lado do nome do processo sugere então que o TIG convencional normalmente não figura na lista dos processos de elevada produtividade. Esse é um paradigma que realmente acompanha o processo de eletrodo não consumível, sendo encontrados vários exemplos em publicações e livros onde o TIG está rotulado como de baixa produtividade ou de baixa velocidade de soldagem, principalmente quando comparado com processos que utilizam eletrodo consumível como o MIG/MAG e arco submerso.

No trabalho de mestrado de Schwedersky [1] foram desenvolvidos procedimentos de soldagem de componentes industriais com velocidade de até 1,5 m/min utilizando o processo TIG sem necessidade de utilização de arame. Foram utilizadas correntes médias de até 550 A e uma mistura com até 15% de hidrogênio adicionado ao argônio para o gás de proteção. Em outra dissertação de mestrado, Olivares [2] quebrou vários paradigmas encontrados na literatura tradicional que tratam da comparação do processo TIG e PAW, mostrando como resultado, procedimentos de soldagem de união de chapas de aço de 6,4 mm, em um único passe, e sem necessidade de realização de chanfro, utilizando a técnica *keyhole* com o processo TIG aplicando corrente da ordem dos 600 A.

Esses dois exemplos de trabalhos realizados no próprio LABSOLDA-UFSC comprovam, cada um de sua maneira, que o processo TIG pode ser vantajoso em situações de alta produtividade usando intensidades de corrente de fato elevadas.

Dessa forma, o presente trabalho faz questão de colocar já, nos primeiros parágrafos do texto, uma posição com relação à denominação de alta ou baixa produtividade dos processos. É importante que qualquer classificação seja feita somente com as devidas considerações. Como exemplo, seria possível considerar somente os casos onde a aplicação dos processos MIG/MAG e TIG é realizada obrigatoriamente de maneira manual. Esses casos de fato representam uma significativa fração do total utilizado no setor industrial. Certamente, se o objetivo fosse dar um parecer

generalizado classificando somente a produtividade de maneira geral para essa gama de aplicações manuais, o diagnóstico seria que o processo TIG apresenta baixa produtividade em comparação com o MIG/MAG.

Considerando agora os casos onde a soldagem pode ser realizada de forma automatizada, e se busca de fato otimizar o tempo de realização e os custos do processo, o processo TIG possui pleno potencial para obtenção de procedimentos de elevada produtividade. Como já citado, trabalhos anteriores [1-2] mostraram essa possibilidade de obtenção de resultados superiores aos demais processos. Essas colocações dos parágrafos anteriores à primeira vista parecem óbvias, mas é importante que isso seja colocado nos textos sempre que possível, para que ao longo do tempo o entendimento geral sobre as capacidades de cada processo seja melhorado.

Apesar do texto dos parágrafos anteriores, não é objetivo do presente trabalho promover o debate da produtividade dos diferentes processos. A questão da produtividade foi levantada principalmente porque a motivação inicial do desenvolvimento do processo TIG duplo eletrodo é justamente o aumento de produtividade em relação ao que normalmente é atribuído ao processo TIG convencional. Apesar da velocidade de soldagem e a taxa de deposição serem os fatores normalmente mais considerados, o termo produtividade representa uma série de fatores que englobam várias outras questões dependendo do caso.

No exemplo de soldagem TIG *keyhole* mostrada por Olivares [2], a elevada produtividade não advém da velocidade de soldagem, que no caso fica próxima aos 0,5 m/min, mas sim do fato de a soldagem ser realizada em único passe, sem necessidade de chanfro em V, e com pouquíssima necessidade de material de adição (somente para compensar o material que formou o reforço na raiz). A Figura 1 mostra uma imagem da junta soldada com o processo TIG *keyhole*.

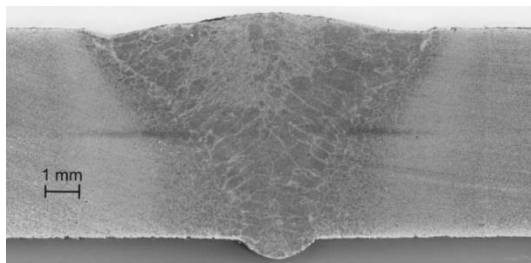


Figura 1 - Soldagem realizada com o processo TIG utilizando a técnica *keyhole* em chapa de aço com 6,35 mm de espessura [2]

No caso do exemplo do trabalho de Schwedersky [1] a maior eficiência na utilização do processo TIG seria obtida em parte por conta da velocidade de soldagem elevada, que atingia 1,5 m/min, igualando a velocidade obtida pelo processo MIG/MAG. Porém, o fator que teria um grande peso seria a redução de custo devido a não utilização do material de adição com o TIG, que no caso do processo MIG/MAG representa um custo adicional inerente ao processo. A Figura 2 mostra uma imagem do cordão obtido com o processo TIG para fechamento de compressor utilizado em equipamentos para refrigeração.

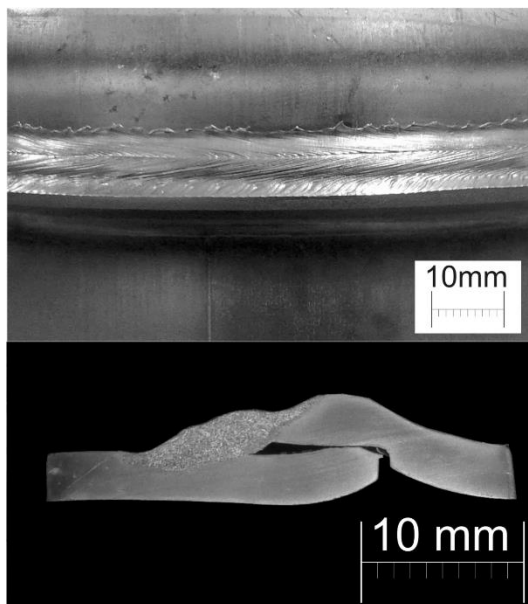


Figura 2 - Soldagem realizada com o processo TIG com velocidade de 1,5 m/min sem necessidade de material de adição [1]

Outro fator que impacta drasticamente na produtividade dos processos é o próprio desenho da junta. Principalmente nos setores de caldeiraria pesada e soldagem de dutos, o desenho das juntas utilizado é tradicionalmente o adequado para soldagem manual, fazendo com que as juntas tenham aberturas de raiz grandes e ângulos excessivamente abertos nos chanfros. Isso resulta em um elevadíssimo volume de material a ser depositado. Nesses casos, o procedimento de alta produtividade poderia ser obtido pela redução da abertura dos chanfros e utilização de procedimentos *narrow gap* (com pequena abertura de chanfro). Mesmo que para encher esses novos chanfros se utilize um procedimento TIG com corrente de

soldagem relativamente baixa, o tempo de execução de cada junta devido à redução do volume de material é muito menor.

Outras questões podem impactar negativamente na produtividade dos processos de soldagem, especialmente para o TIG. Por exemplo, nos desenvolvimentos de soldagem TIG de alta velocidade realizados no trabalho de Schwedersky [1], apesar dos resultados obtidos indicarem que o procedimento poderia ser vantajoso ao substituir o processo MIG/MAG em linha de produção, o procedimento com o TIG não chegou de fato a ser implantado devido ao índice de defeitos ser maior e também devido a maior necessidade de paradas para troca do eletrodo de tungstênio em comparação com o MIG/MAG.

Apesar dos diferentes critérios de avaliação citados, os quais fazem com que a questão da produtividade seja de fato um critério complexo e relativo, é indiscutível que a velocidade do processo impacta diretamente a produtividade, e a busca por maiores velocidades é uma tendência natural para qualquer processo industrial. Também é indiscutível que para a obtenção de maiores velocidades usando processos de soldagem a arco, é necessário que o processo utilizado proporcione aumento da taxa de deposição (ou capacidade de fusão) à medida que a velocidade é aumentada. Para isso, é necessário o aumento da corrente de soldagem. É nesse ponto que o processo TIG apresenta uma significativa limitação, que é a tendência de formação de defeitos quando se utiliza grande intensidade de corrente, maiores que 300 A, por exemplo.

3.2. FORMAÇÃO DE DEFEITOS NA SOLDAGEM TIG COM ELEVADA CORRENTE

O processo TIG apresenta uma tendência crescente para a formação de defeitos de falta de continuidade do cordão conforme a corrente de soldagem é aumentada. A partir dos 300 A, principalmente utilizando Ar puro no gás de proteção, essa tendência fica bastante evidente. Nessa condição, torna-se difícil a obtenção de cordões de solda contínuos, com as características desejadas. Normalmente o que ocorre é que os cordões solidificam com regiões alternadas entre crateras e protuberâncias, exibindo aparência conforme mostrado nas Figura 3 e Figura 4. Esse defeito recebe a denominação de *humping*.

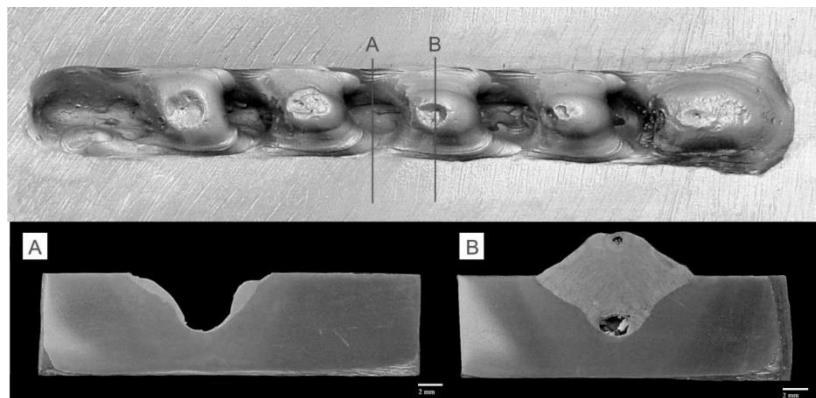


Figura 3 - Aspecto típico de um cordão sobre chapa feito com o processo TIG usando corrente elevada mostrando duas seções transversais [1]



Figura 4 - Aspecto da formação de defeitos tipo *humping* em soldagem de chapas de aço carbono 3mm de espessura em junta sobreposta utilizando o processo TIG

O mecanismo de formação desses defeitos tem sido tema de diferentes publicações já a partir da década de 1960. O trabalho de Savage et al. [3] apresenta uma grande quantidade de experimentos realizados, como por exemplo, o gráfico da Figura 5 mostrando que ocorre diminuição na velocidade máxima que é possível soldar sem o surgimento de *humping*, à medida que a corrente de soldagem é aumentada. Além disso, o trabalho mostra que a utilização de He possibilita obtenção de maiores velocidades de soldagem, sem o surgimento de *humping*, em comparação ao Ar.

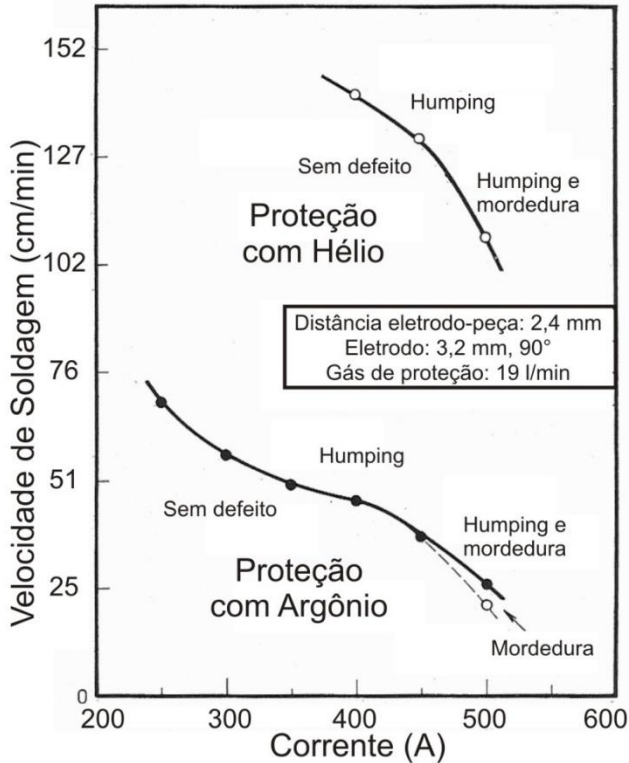


Figura 5 - Efeito do gás de proteção na velocidade limite para aparecimento de defeitos [3]

Os trabalhos de Mendez et al. [4-7] propuseram um modelo explicando a formação do *humping* na soldagem TIG com elevadas correntes de soldagem, o qual pode ser apontado como o mais adequado para explicar o fenômeno nesse processo quando se utiliza argônio puro no gás de proteção. O referido modelo foi explicado de maneira extensiva na dissertação de Schwedersky [1], sendo que nesse trabalho também foram propostas complementações. Descrevendo de maneira bem resumida, o fator principal que causa o defeito é o balanço desfavorável entre a pressão do arco e a eficiência de fusão obtida com o gás utilizado que irá disponibilizar maior ou menor quantidade de metal fundido disponível na poça. Para o argônio puro, a pressão do arco empurra o metal líquido da poça de fusão para trás, tendendo a formar uma cratera na região logo abaixo do arco. À medida que a velocidade de soldagem é aumentada, ocorre solidificação prematura de partes da poça de fusão que conduzem o metal em estado líquido em direção à região posterior da poça de fusão,

fazendo com que o cordão solidifique de maneira não contínua, tipicamente apresentando o aspecto de crateras e protuberâncias de maneira alternada. Os trabalhos de Mendez et al. citam também outros fatores que influenciam na formação e solidificação da poça, mas que foram considerados de menor importância em comparação com a pressão do arco (considerando o processo TIG em elevada velocidade), como por exemplo: forças eletromagnéticas, tensão superficial, *buoyancy*, efeito Marangony.

O trabalho de Kumar e Debroy [8] mostra uma ampla análise da literatura reunindo vários aspectos interessantes de outras publicações, e sugerindo algumas estratégias para diminuir a formação de *humping* na soldagem TIG. Entre esses aspectos, a inclinação da tocha empurrando (em relação à direção de soldagem) é apontado como uma solução que diminui o *humping*. Além disso, o trabalho cita resultados de outras publicações mostrando que a velocidade de soldagem poderia ser aumentada se o arco fosse modificado pela aplicação de um campo magnético externo e assumisse um formato elíptico, com dimensões maiores alinhadas com a direção de soldagem.

Todos esses trabalhos [3-8] serviram de ponto de partida para as análises realizadas no trabalho relacionado em [1] onde a questão da formação do *humping* também foi estudada. Nesse trabalho ficou comprovado que o uso de misturas com pequenos percentuais de hidrogênio (5-15% em volume) no argônio possibilita o aumento da velocidade de soldagem sem aparecimento de *humping*. Além disso, foram realizados ensaios comparando a eficiência de fusão do processo TIG utilizando diferentes gases. A Figura 6 mostra uma comparação da quantidade de metal fundido para a mesma corrente média com diferentes gases (medição obtida em ensaios tipo cordão sobre chapa). É possível verificar que para a mesma intensidade de corrente, o He proporciona uma quantidade de material fundido consideravelmente maior do que o Ar puro. Com relação às misturas Ar-H₂, à medida que o teor de H₂ foi aumentado, maior foi a quantidade de material fundido.

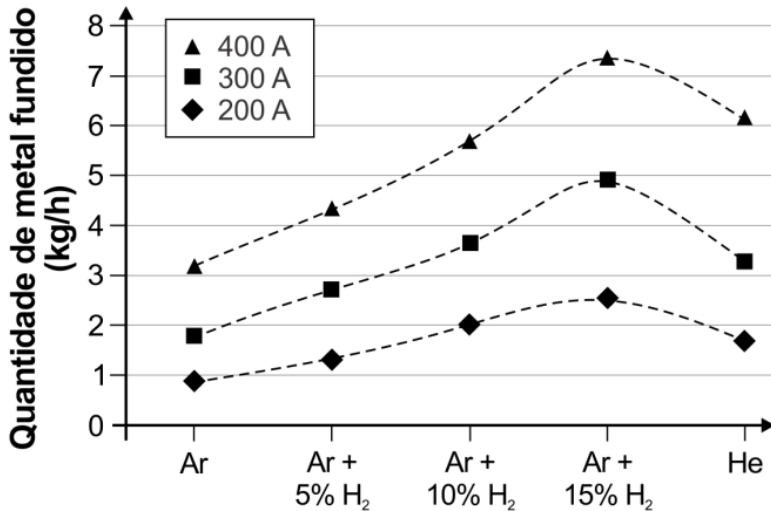


Figura 6 – Quantidade de metal fundido utilizando o processo TIG para os diferentes gases (DEP 3 mm) [1]

Não foram encontrados dados na literatura que indicassem que adição de percentuais de H₂ ao Ar causa mudanças significativas na pressão do arco em relação ao argônio puro (considerando os teores de H₂ no Ar de até 15%). As observações do arco e poça de fusão durante as soldagens também não permitiram inferir que houvesse modificação significativa nesse aspecto. Dessa forma, a diminuição da tendência de aparecimento de *humping* na soldagem TIG de elevada velocidade possibilitada pela utilização de misturas Ar-H₂ foi explicada no trabalho [1] pela maior eficiência de fusão das misturas Ar-H₂ em comparação com o Ar puro.

Ao final da dissertação [1], após realização de uma grande quantidade de testes de soldagem utilizando o TIG em elevada corrente, foi possível apontar algumas considerações do ponto de vista prático visando diminuir a ocorrência de *humping* e possibilitar a soldagem TIG em elevada velocidade. São elas:

- O modelo apresentado por Mendez em seus trabalhos [4-6] descreve muito bem o que se observa na prática. Durante as soldagens com correntes superiores a 300 A, é visível a significativa atuação da pressão do arco na poça de fusão, que tende a formar uma cratera deslocando o metal líquido para trás. Baseado nisso, o trabalho de Schwedersky [1] propôs a explicação complementar destacando também a importância da eficiência de fusão dos diferentes gases:

-Para o Ar puro, a quantidade de metal fundido é pequena, e a pressão do arco relativamente elevada. Dessa forma, o balanço entre esses dois fatores é desfavorável, de modo que a pressão do arco facilmente tende a empurrar o pouco metal líquido disponível na poça, criando assim já em velocidades não tão elevadas as condições que favorecem a formação do *humping*.

-Para a soldagem utilizando He, (conforme será mostrado nas seções seguintes) a pressão do arco é muito menor do que o Ar, o que por si só já possibilitaria a maior velocidade de soldagem. Além disso, conforme mostrado na Figura 6, para a mesma corrente média, a quantidade de metal fundido em comparação com o Ar é muito maior (quase o dobro), o que também já favoreceria a obtenção de maiores velocidades de soldagem. A conjunção desses dois fatores justifica a menor susceptibilidade do He para a formação de defeitos.

- Para as misturas Ar-H₂, considerando a extensiva utilização dessas misturas nos trabalhos anteriores, não foram encontrados indícios que a pressão seja significativamente diferente do que a do Ar puro. Apesar disso, a quantidade de material fundido é muito maior para a mesma corrente média em comparação com o Ar puro. Dessa forma, apesar de possivelmente apresentar pressão do arco ainda relativamente elevada, a maior quantidade de material fundido disponível na poça de fusão possibilita que a solidificação prematura e a formação de defeitos da poça de fusão não ocorra em velocidades tão baixas como ocorre utilizando Ar puro.

-O posicionamento da tocha de soldagem empurrando, com ângulos bem pequenos em relação à superfície da peça possibilitou aumentar significativamente a velocidade de soldagem.

-A utilização de um eletrodo afiado com ponta em formato de tronco de cone usando diâmetros ente 1,5-2 mm favoreceu a obtenção de maiores velocidades na soldagem de chapas de aço em junta sobreposta (em comparação com a utilização de eletrodo com afiação pontiaguda).

-A utilização de pequenas distâncias eletrodo-peça fazem com que o arco tenha atuação mais concentrada de modo que a eficiência de fusão localmente seja aumentada (já que o arco produz um cordão mais estreito). Na prática, um sistema de controle de altura de arco, como um AVC (*arc voltage control*) com adequada dinâmica de resposta, viabiliza a manutenção dessa distância pequena (menor que 1 mm, por exemplo) mesmo com velocidades de soldagem maiores que 1 m/min.

3.3. PRESSÃO DO ARCO NA SOLDAGEM TIG

A pressão do arco apresenta importante papel nos processos a arco, causando significativa influência no perfil da solda e profundidade de penetração obtida. Principalmente nos processos de eletrodo não consumível, onde a utilização de metal de adição não é obrigatória, o efeito da pressão do arco é claramente perceptível na poça de fusão. Devido à grande importância para o presente trabalho, esse fenômeno será abordado de forma mais extensa no presente item.

O fluxo de plasma em um arco elétrico como resultado do campo magnético induzido pelo próprio arco foi explicado pela primeira vez por Maecker [9] em 1955 com resultados de experimentos usando eletrodos de carvão, sendo o fenômeno conhecido até hoje com o nome deste pesquisador.

O parágrafo seguinte traz uma boa definição para explicar a formação de pressão do arco TIG, encontrada no trabalho de Lin e Eagar [10]:

A pressão do arco (ou pressão de estagnação) é causada pela transferência de momento do jato de plasma colidindo contra a poça de fusão. Quando a corrente passa por um condutor, ela gera um campo magnético circunferencial. A interação entre a corrente e seu próprio campo magnético induzido produz uma força (chamada de força de Lorentz) em direção ao eixo central do próprio campo magnético, conforme mostrado na Figura 7 (a). No processo TIG, o condutor é o gás de proteção ionizado. A constrição da força de Lorentz é balanceada pelo gradiente de pressão radial agindo em direção oposta. Como o arco TIG possui uma distribuição de corrente divergente, conforme mostrado na Figura 7 (b), a densidade de corrente “ J ” próximo ao eletrodo de Tungstênio (cátodo) será maior do que a densidade de corrente próximo ao metal de base (ânodo). Dessa forma, a pressão estática do gás na região próxima ao cátodo é maior do que nas proximidades do ânodo. A diferença de pressão estática do gás entre as regiões do ânodo e o cátodo faz com que o plasma se torne um jato, acelerado em direção ao ânodo.

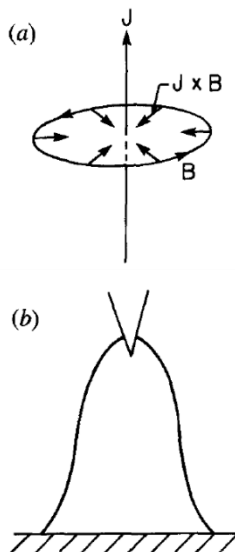


Figura 7 – (a) Campo magnético B gerado pela densidade de corrente J . As flechas em direção ao centro representam a força de Lorentz $J \times B$. (b) Arco divergente [10]

Segundo dados da literatura, o jato de plasma no processo TIG pode atingir velocidades de centenas de metros por segundo, e a velocidade torna-se maior com o aumento da corrente. No trabalho de Wu et al. [11], os autores calculam que a velocidade axial do jato de plasma atinge 184 m/s e 235 m/s para corrente de 100 e 200 A, respectivamente. Os dados de Hsu et al. também mostram valores semelhantes com 173 m/s, 294 m/s e 395 m/s para correntes de 100, 200 e 300 A respectivamente.

A caracterização da pressão de estagnação do arco pode ser feita experimentalmente utilizando o método denominado “*small hole*”. Nesse método, utiliza-se normalmente uma chapa de cobre refrigerada por água com um furo passante de pequeno diâmetro. Na outra extremidade do orifício, localizada na parte de baixo da chapa, é conectado um transdutor para medição de pressão. Esse furo serve como vaso comunicante entre uma pequena região da superfície da chapa e o sensor de pressão, permitindo que a pressão logo acima da superfície do ânodo possa ser medida sem que a temperatura do arco danifique o transdutor. Conforme a posição do arco em relação à posição do furo na chapa de cobre é modificado, é possível a obtenção de um perfil de pressão do arco para diferentes distâncias radiais. Foram encontrados alguns trabalhos que utilizam esse método, e apresentam resultados experimentais de medição da pressão do arco do processo TIG. A Figura 8 mostra um esquema

didático dos principais componentes do aparato utilizado para medição da pressão de estagnação.

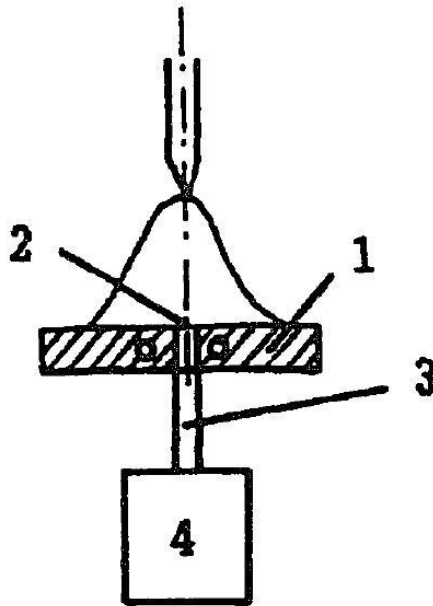


Figura 8 - Representação didática do aparato usado para medição da pressão de estagnação do arco para o processo TIG. 1- Base de cobre refrigerada; 2- Furo passante; 3- Duto ou sistema de comunicação entre o furo e o sensor; 4- Sensor medidor de pressão e sistema de aquisição dos dados. (Adaptado de [12])

Antes de analisar os dados encontrados na literatura, é importante fazer as devidas considerações antes de comparar os resultados dos diferentes trabalhos. No trabalho de Schnick et al. [13], os autores mostram resultados de medições que indicam que a modificação do diâmetro do orifício de medição modifica significativamente os valores do experimento. Esses resultados estão mostrados no gráfico da Figura 9. Além do próprio diâmetro do orifício, é de se esperar também que outras características construtivas, tipo do sensor, comprimento do orifício de medição, ou a distância que o sensor fica da superfície da chapa causem alguma influência no tempo de equalização da pressão instantânea que o sensor está exposto, resultando consequentemente nas diferenças dos valores absolutos resultantes. Dessa forma acredita-se que sempre irão existir diferenças nos valores obtidos usando aparatos diferentes, dificultando uma comparação direta entre os valores absolutos encontrados

em diferentes publicações. Além disso, o próprio *set-up* das configurações do processo como tipo da tocha, afiação do eletrodo, DEP, etc, também tendem a apresentar resultados diferentes. Por isso, o presente trabalho considera adequada a metodologia de usar valores relativos, expressos em percentual do valor de pressão do argônio puro, por exemplo, como a forma mais adequada para possibilitar uma comparação entre os diferentes trabalhos.

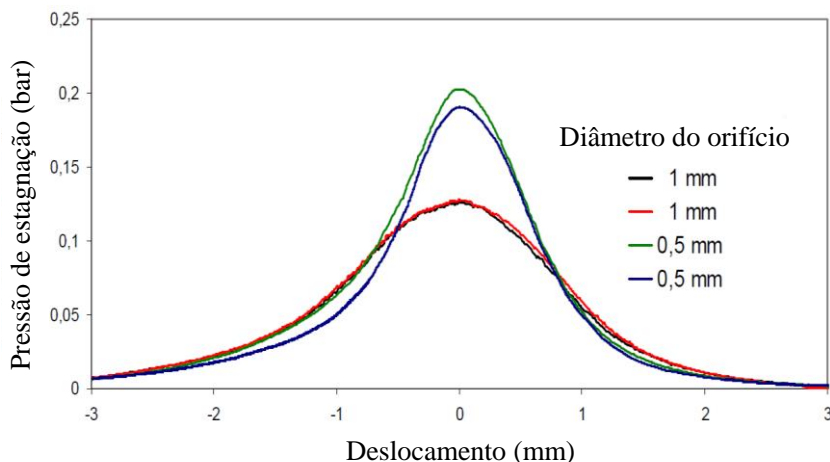


Figura 9 – Resultados de ensaio de medição de pressão de estagnação do arco usando os mesmos parâmetros de soldagem, porém utilizando diferentes diâmetros no orifício de medição [13]

Considerando os resultados de medições de pressão de estagnação do arco TIG encontradas, a comparação do processo usando Ar e He é uma das mais conhecidas. No caso do trabalho de Lin e Eagar [10], a pressão máxima medida usando Ar foi 2,36 vezes maior do que usando He para corrente de 300 A, e no trabalho de Campbell et al. [14] foi de 2,37 vezes considerando a corrente de 200 A. A Figura 10 mostra os dados desses trabalhos, que foram publicados com quase três décadas de diferença um do outro, ilustram bem o que foi exposto no parágrafo anterior. Apesar da proporção entre os valores da pressão máxima do Ar e do He mostrarem resultados muito parecidos, os valores absolutos são completamente diferentes, sendo que os valores de Campbell et al. [14] foram praticamente o dobro, mesmo utilizando corrente menor. Essa diferença pode ter vindo de vários fatores como já citado anteriormente: diferentes DEP, dimensões do orifício de medição, ou mesmo diferenças na sensibilidade do transdutor

de pressão, perda de carga do sistema, etc. Segundo Lin e Eagar [10], a menor pressão do arco com He seria resultado da menor densidade e maior viscosidade em elevadas temperaturas. O trabalho Zähr et al. [15], sugere também que na comparação com o Ar, a menor condutividade elétrica do He em temperaturas abaixo de 20.000 K faça com que a área de acoplamento do arco na região catódica tenha que ser maior (para possibilitar a passagem de toda corrente), diminuindo assim a força de Lorentz e a velocidade do fluido (gás ionizado).

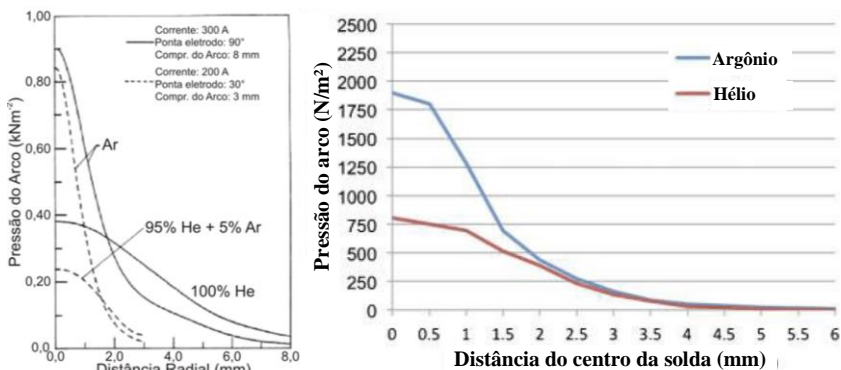


Figura 10 - Comparação da pressão de estagnação do arco TIG usando He e Ar. Gráfico da esquerda feito por Lin e Eagar [10]. Gráfico da direita feito por Campbell et al. [14] para a corrente de 200 A

Com relação à influência do aumento da corrente de soldagem nos valores da pressão de estagnação do arco usando Ar puro, o trabalho de Fan e Shi [12] mostra que o valor máximo da pressão aumenta cerca de cinco vezes quando a corrente é aumentada no intervalo 100-200 A, enquanto os resultados de Lin e Eagar [10] mostram um aumento linear do valor máximo da pressão considerando o intervalo 300-600 A. A Figura 11 mostra os resultados dos dois autores.

Considerando o ângulo de afiação da ponta do eletrodo, também foram encontrados mudanças significativas nos valores da pressão de estagnação nos diferentes trabalhos [10, 12], com a mesma tendência de maiores valores para os eletrodos com menor ângulo de afiação (que seria o eletrodo com a ponta mais aguda). A Figura 12 mostra os gráficos dos dados encontrados pelos dois autores. A explicação para esse comportamento, segundo os autores de [12], seria que um menor ângulo da ponta do eletrodo resulta em uma diminuição da seção condutiva da ponta do eletrodo, a qual causa um aumento na força eletromagnética com

aumento da densidade de corrente (aumentando ainda mais a diferença de densidade de corrente entre as regiões anódicas e o cátódicas).

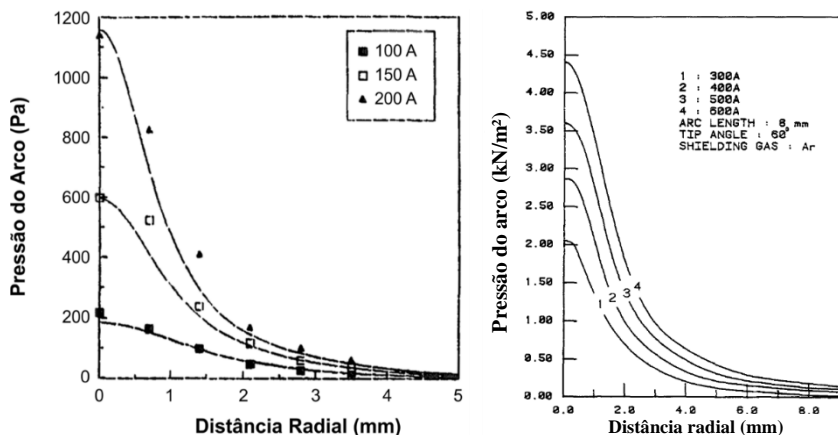


Figura 11 - Resultados de medição de pressão de estagnação do arco TIG com diferentes correntes. Gráfico esquerda: Fan e Shi [12] DEP 6,3mm; Diâmetro do eletrodo 3,2 mm; Ang. de afiação eletrodo 60°. Gráfico direita: Lin e Eagar [10]

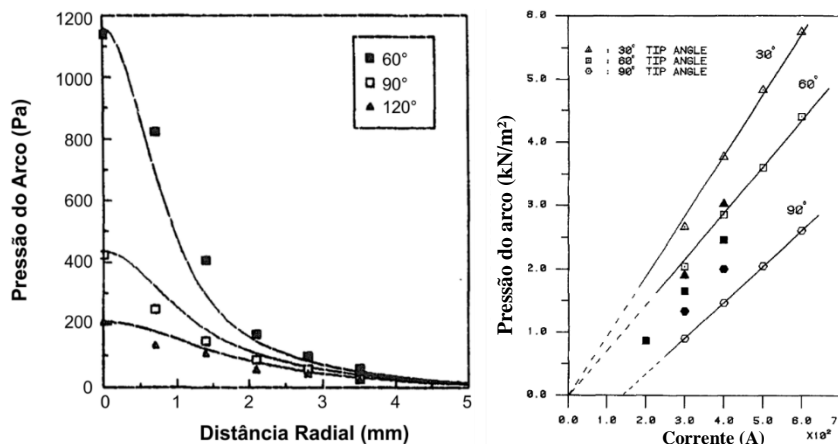


Figura 12 - Pressão de estagnação do arco TIG de acordo com o ângulo de afiação do eletrodo. Gráfico esquerda: Fan e Shi [12], Ar puro, 200 A, DEP 6,3 mm. Gráfico direita: Lin e Eagar [10], Ar puro, DEP 8 mm

Com relação à distância eletrodo peça, os resultados de Fan e Shi [12] mostraram uma clara tendência de redução dos valores de pressão com o aumento da distância para um ensaio realizado usando 200 A e Ar puro.

Os dados de Lin e Eagar [10] mostraram que os valores máximos não tiveram variação significativa com a modificação da DEP em ensaio usando 300 A e Ar puro. Somente para o ensaio com He o aumento da DEP resultou em diminuição dos valores máximos de pressão do arco. A Figura 13 mostra os dados dos dois autores.

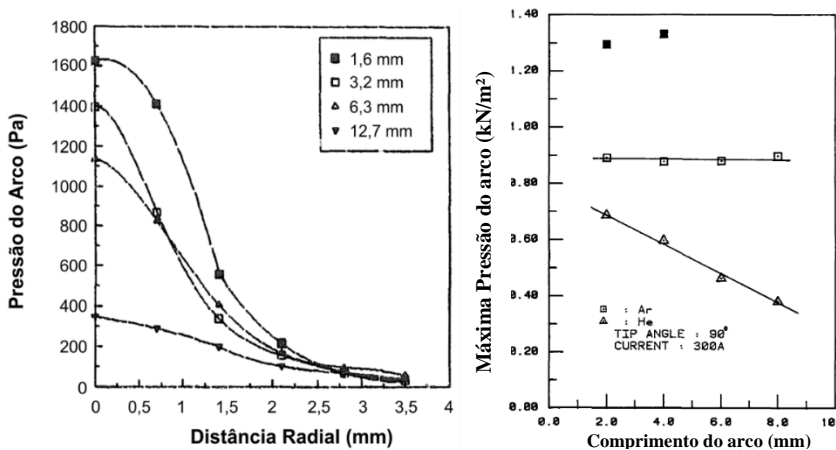


Figura 13 - Variação da pressão do arco no processo TIG de acordo com a utilização de diferentes DEP. Gráfico esquerda: Fan e Shi [12]: Ar puro, 200 A, afiação do eletrodo com ponta em 60°. Gráfico direita: Lin e Eagar [10]

Apesar da elevada pressão do arco no processo TIG quando usado com elevadas correntes de soldagem ser considerado um fator prejudicial para esse processo na maioria das aplicações, é fundamental considerar que no caso da soldagem TIG com a técnica *keyhole* (descrita no trabalho de Olivares [2]), é justamente a elevada pressão do arco que possibilita a soldagem com penetração em chapas de espessura 6,35 mm. Além disso, é importante ressaltar que mesmo nas aplicações onde a técnica não é a *keyhole*, é óbvio que a pressão do arco tende a apresentar em muitos casos um papel benéfico e significativo na obtenção dos valores de penetração requeridos.

4. INTRODUÇÃO À SOLDAGEM TIG DUPLO ELETRODO

4.1. ORIGEM DA IDEIA

A ideia de testar o processo duplo eletrodo surgiu no contexto já citado no item 3.1., onde se pesquisava alternativas para melhorar o desempenho do processo TIG e possibilitar velocidade de soldagem superior a 1 m/min sem ocorrência de *humping*. A primeira ideia de utilizar um processo com dois eletrodos veio em parte do trabalho de Kumar e Debroy [8] que cita a manipulação do arco por meio de campos magnéticos para alterar a morfologia do arco e possibilitar maiores velocidades. Os trabalhos de Nomura et al. [16-17] são exemplos onde foram utilizados ímãs permanentes para alterar a morfologia do arco, conferindo um formato elíptico ao arco conforme mostrado nos pontos de solda da Figura 14. Ao utilizar o arco deformado, com as maiores dimensões da elipse alinhadas paralelamente à direção de soldagem, os autores provaram ser possível aumentar a velocidade de soldagem, conforme mostrado nos testes da Figura 15. Vislumbrou-se que com a utilização de dois eletrodos seria possível obter um perfil de fusão na peça que fosse mais favorável à soldagem de elevada velocidade.

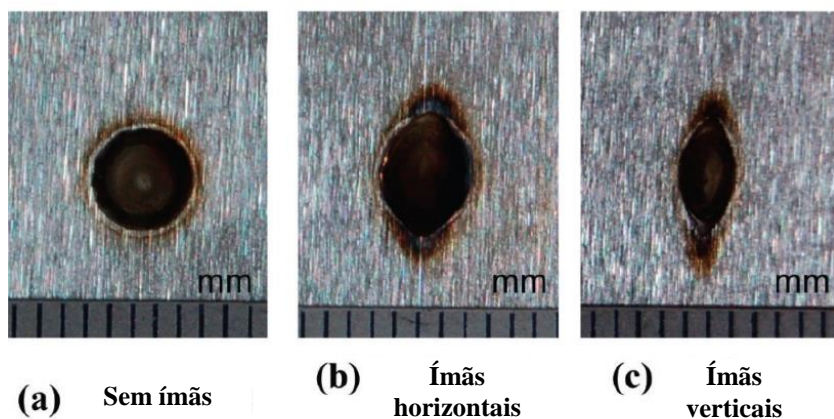


Figura 14 - Pontos de solda TIG mostrando a possibilidade de deformação do morfologia do arco usando campo magnético externo [17]

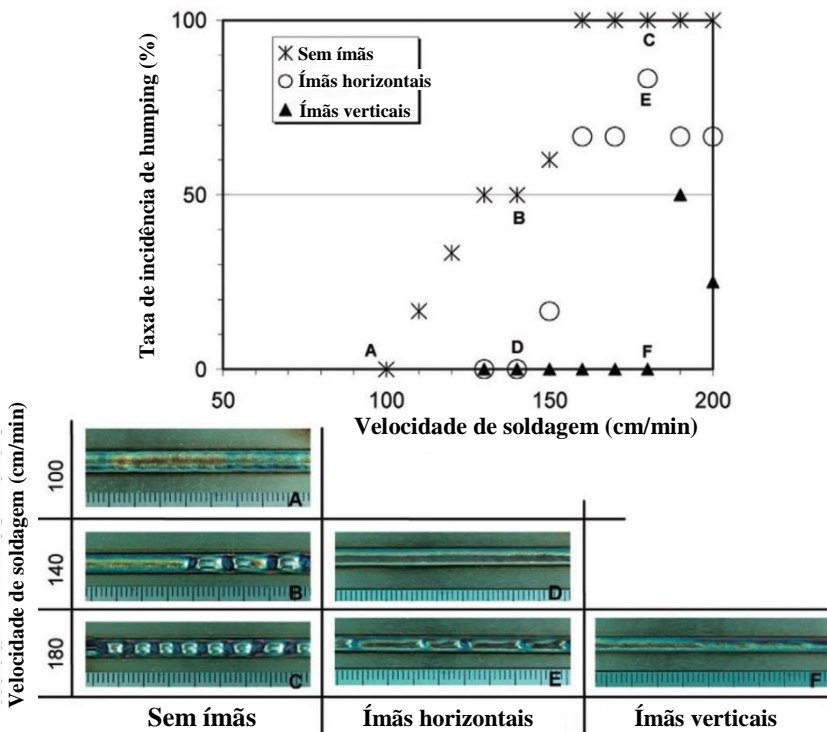


Figura 15 - Resultados de Nomura et al. [17] mostrando que a manipulação do arco TIG usando campo magnético externo possibilitou aumentar a velocidade de soldagem sem formação de humping de 100 para 180 cm/min

Outra observação que também serviu de inspiração para o desenvolvimento do TIG duplo eletrodo foram os sistemas de soldagem com dois ou três tochas TIG que são utilizados para a fabricação de tubos de aço inox com costura. Esse conjunto de tochas opera em posição alinhada com a junta, e fica posicionado no meio dos rolos de perfilamento que conformam os tubos a partir de uma bobina de tira de aço. Em uma visita a uma empresa fabricante de tubos que utiliza esse sistema, foi constatado que são usadas correntes na ordem de 200 A, obtendo velocidades de soldagem que variam de 1,5-4 m/min. A Figura 16 mostra uma fotografia desse equipamento, que normalmente conta com sistemas de oscilação magnética integrados. Segundo o fabricante, essa oscilação magnética do arco é utilizada para diminuir problemas como pequenos desalinhamentos entre a tocha e a junta, mordedura, falta de fusão e porosidade.

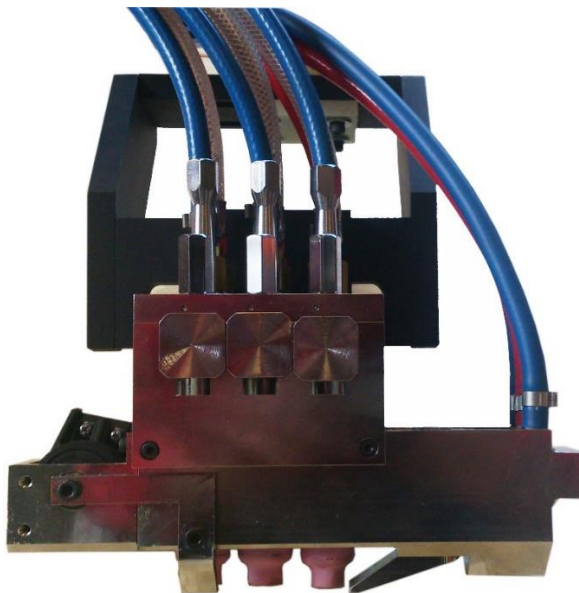


Figura 16 - Sistema de soldagem que utiliza 3 tochas TIG em sequência, utilizado para fabricação de tubos com costura. Fonte: www.ledica.it [18]

4.2. DEFINIÇÃO DO PROCESSO TIG DUPLO ELETRODO

Com relação à nomenclatura, o presente trabalho classifica como TIG Duplo Eletrodo, ou *Double Electrode GTAW* em inglês, os processos de soldagem onde:

- São utilizados dois eletrodos de tungstênio com pequeno afastamento um do outro;
- Os eletrodos são isolados eletricamente e ligados em fontes de corrente com potencial isolado;
- O arco em cada eletrodo teve suas características significativamente alteradas em relação ao que seria normal caso fosse utilizado de maneira isolada.

Esses requisitos foram listados como tentativa de iniciar uma padronização na nomenclatura deste processo, uma vez que em cada diferente trabalho encontrado, os autores utilizaram denominações diferentes. Também serão utilizadas as seguintes siglas para denominar os processos: TIG-DE em português, e DE-GTAW nas publicações em inglês.

Neste caso, o sistema mostrado na Figura 16 não entraria dentro dessa classificação, pois a influência de cada arco é praticamente desprezível devido à grande distância entre os eletrodos.

Do ponto de vista técnico, o processo TIG duplo eletrodo é variante do processo TIG que se caracteriza por utilizar dois eletrodos de tungstênio posicionados em pequenas distâncias (na prática, distâncias menores do que 15 mm, aproximadamente). Os eletrodos devem estar em potencial elétrico isolado, e são conectados em fontes de corrente de potencial isolado, de forma que a corrente de cada eletrodo pode ser regulada de maneira independente. Devido à pequena distância entre os dois eletrodos, o campo eletromagnético de um arco influencia fortemente no deslocamento do jato de plasma, fazendo com que a morfologia dos arcos acabe sendo bastante alterada. Como normalmente os dois eletrodos estão ligados na mesma polaridade, a tendência dos arcos é de se atrair, e de acordo com a configuração utilizada, geralmente não é possível visualizar a separação entre os dois arcos, resultando na formação um arco combinado (denominado também híbrido), com características diferenciadas do arco no processo com eletrodo único. Por conta da formação desse novo arco oriundo dos dois eletrodos, será utilizada a denominação o arco (no singular) também para o processo TIG-DE. A Figura 17 mostra um desenho esquemático com as ligações utilizadas no processo TIG-DE.

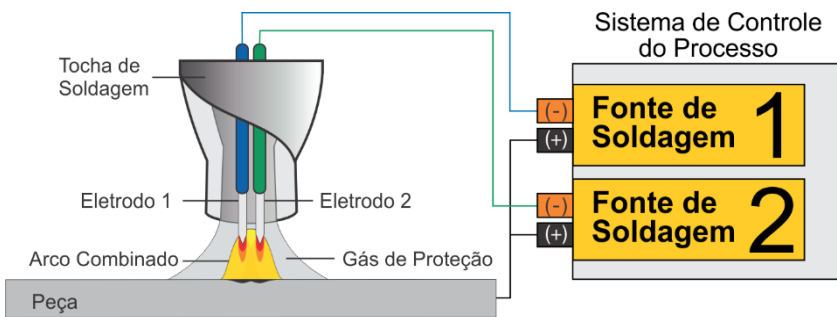


Figura 17 -Desenho esquemático representando o processo TIG duplo eletrodo

4.3. DESVIO DO ARCO EM PROCESSOS COM DUPLO ELETRODO

Antes de abordar as publicações encontradas que tratam do processo TIG-DE, é importante apresentar algumas considerações básicas do eletromagnetismo, que permitem explicar o desvio do arco causado pela proximidade de um segundo arco, uma vez que esse fenômeno apresenta

grande influência para o processo. Na prática, é bastante difundido o conhecimento que dois arcos de mesma polaridade sofrem atração quando estão próximos. Também são conhecidos outros efeitos que fazem com que o arco seja desviado mesmo quando não há influência de um segundo arco, tal como o sopro magnético, normalmente causado por diferenças geométricas da peça ou posição dos cabos. Também existem equipamentos concebidos especificamente para induzir campos magnéticos na região do arco, e produzir deslocamento magnético do arco com alguma finalidade.

Todos esses fenômenos podem ser explicados partindo das leis do eletromagnetismo básico. Uma partícula eletricamente carregada que se movimenta em um campo magnético irá experimentar uma força tendendo a modificar sua direção. A orientação dessa força em relação às direções do campo elétrico e do deslocamento, para o caso de uma carga elétrica positiva, está representada na Figura 18.

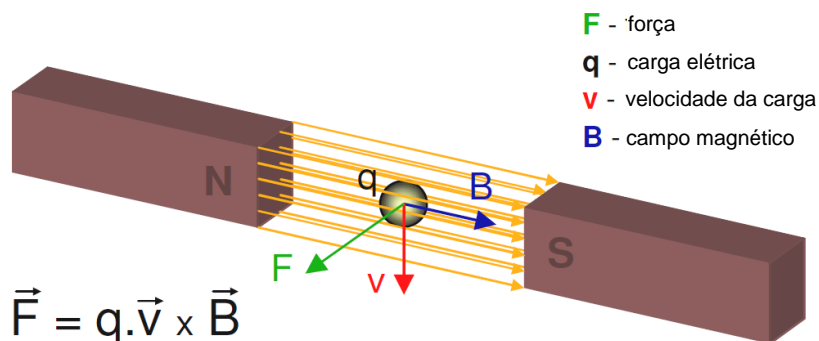


Figura 18 –Força produzida em uma carga elétrica positiva se movendo por um campo magnético. Adaptado do trabalho de Reis [19]

Em um processo onde dois arcos estão posicionados em pequenas distâncias, como no TIG-DE, a passagem de corrente pelo arco 1 (I1), irá gerar um campo eletromagnético (B1). Devido à pequena distância entre os eletrodos, esse campo magnético B1 irá atravessar e interagir com o arco 2 (que são partículas carregadas em movimento), tendendo a alterar a direção dessas partículas e atrair o arco 2 em direção ao arco 1. A mesma coisa irá acontecer com as partículas carregadas do arco 1, que serão atraídas em direção ao arco 2. A Figura 19 mostra uma ótima ilustração didática em diferentes passos feita por Reis [19], que ajuda a entender porque sempre a tendência é de atração quando os dois arcos estão operando na mesma polaridade, independente qual polaridade seja utilizada. No quadro 2 estão representados os campos magnéticos gerados

em cada arco. No quadro 3, os campos magnéticos induzidos por cada arco estão representados de maneira simplificada. No quadro 4, estão representadas os campos magnéticos resultantes em torno de cada arco. No quadro 5, estão representadas as forças geradas pelo campo magnético em cada arco. No quadro 6, estão mostradas a direção das forças resultantes em cada arco, que levam sempre a tendência de atração dos arcos. Caso a polaridade em cada arco fosse diferente, a tendência seria de repulsão.

O diagrama mostrado na Figura 19 nos fornece a explicação simplificada da tendência de interação dos dois arcos do processo TIG-DE, e é muito útil para entender o comportamento do processo nas diferentes condições, principalmente quando o afastamento entre os eletrodos é modificado. Na prática, o formato tridimensional do arco faz com que todas as interações de campos magnéticos e forças resultantes tenham também componentes tridimensionais em diferentes direções, resultando em um fluxo de partículas carregadas que apresenta orientações diversas e modificando drasticamente o aspecto do arco. Conforme o posicionamento dos eletrodos e demais parâmetros escolhidos, o resultado da direção de boa parte do fluxo de plasma pode apresentar inclusive direções contrárias à peça. Isso será discutido ao longo do trabalho.

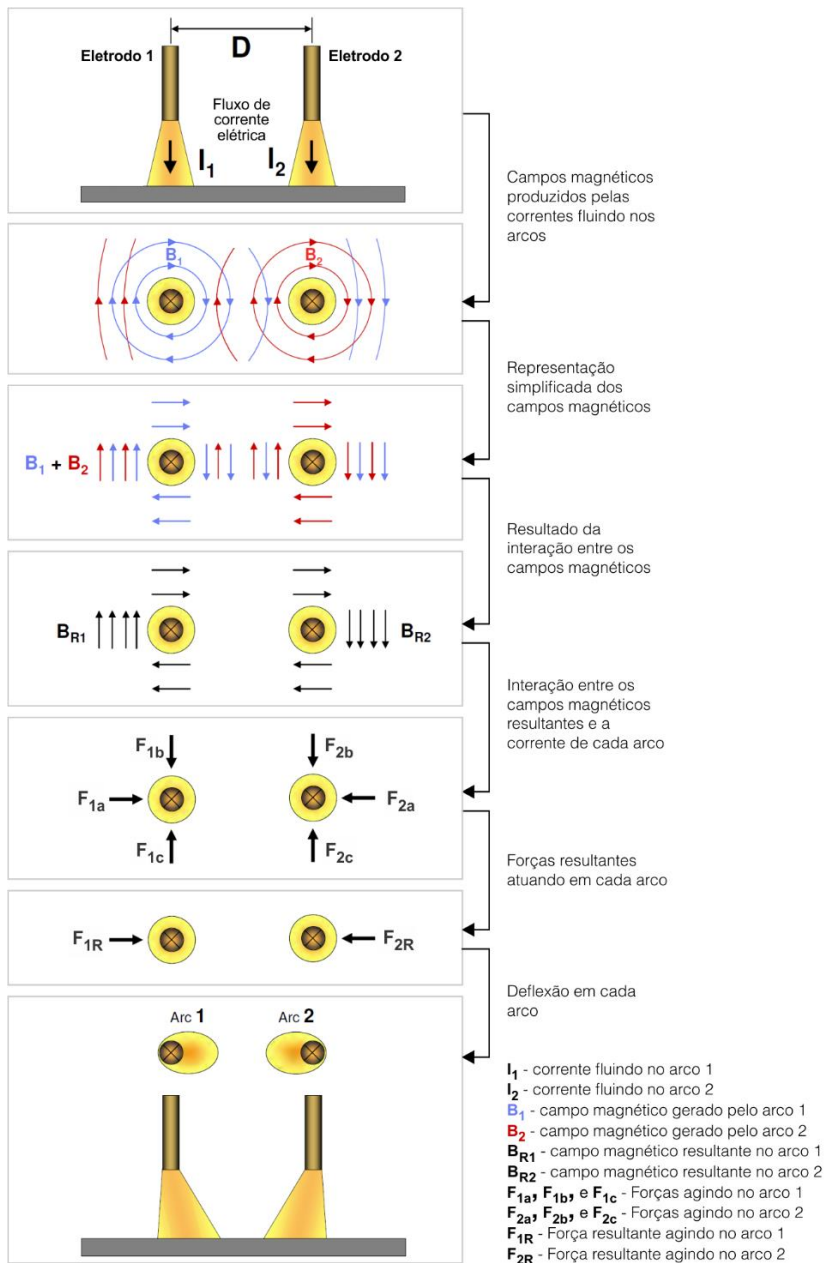


Figura 19 - Diagrama explicando a atração de dois arcos de mesma polaridade. Adaptado de Reis [19]

4.4. REVISÃO DA LITERATURA SOBRE O PROCESSO TIG DUPLO ELETRODO

Foram encontradas poucas publicações mostrando trabalhos com o processo TIG duplo eletrodo, sendo que todas conhecidas até o momento pertencem a quatro grupos de pesquisadores diferentes, (dois japoneses, e dois grupos chineses). O artigo mais antigo encontrado data do ano de 1998, contudo foi publicado apenas em japonês. A primeira publicação em língua inglesa data de 2004 [20], mostrando que o processo pode ser considerado relativamente novo. Como cada grupo apresentou trabalhos com abordagens bastante diferenciadas, as informações mais importantes de cada grupo de pesquisadores foram condensadas de maneira separada, e serão apresentadas a seguir.

O trabalho de Kobayashi et al. [20] relata o estudo, desenvolvimento e aplicação prática de um sistema TIG-DE, que os autores denominam SEDAR-TIG “Super Energetic Dual Arc TIG”. Esse sistema foi aplicado na soldagem de um reservatório de gás natural de grande capacidade no Japão. Essa estrutura foi construída com liga de aço contendo 9% de níquel em chapas de espessuras até 50 mm com chanfro em X. A soldagem foi conduzida com alimentação de material de adição usando a técnica *hot-wire*. A tocha utilizada está mostrada na Figura 20 (a), possui eletrodos de perfil retangular posicionados em distâncias 1 ou 2 mm um do outro, possibilitando assim a boa acessibilidade dentro do chanfro. Nessa aplicação, a tocha foi utilizada com orientação dos eletrodos de maneira oblíqua em relação à junta, e corrente pulsada nos dois eletrodos com o período de pulso defasado em relação ao período de base, conforme mostrado na Figura 20 (b). O controle independente da pulsação em cada eletrodo de maneira sincronizada com a movimentação de soldagem permitiu que fossem estabelecidas diferentes estratégias para aumentar a produtividade de acordo com a posição da junta, por exemplo:

- Na posição horizontal foi utilizada maior corrente no eletrodo que estava em baixo, contornando assim a tendência de falta de fusão no lado de baixo da junta, devido à tendência de escorrimento do cordão que ocorre naturalmente na borda inferior do arco.

- Na posição vertical, a estratégia de utilizar o pulso somente nas extremidades da junta, mantendo a corrente baixa quando a tocha estava no meio do chanfro, possibilitou obter maiores velocidades de soldagem sem falta de fusão nas bordas.

Com o aumento de produtividade obtido pelo sistema TIG-DE em relação ao convencional, os autores consideraram o sistema foi mais vantajoso do que o processo arco submerso, apontando diferentes

vantagens como a redução do ângulo de abertura do chanfro, diminuindo 15% do volume de material depositado; a possibilidade de realização de um passe de raiz adequado, sem necessidade de remoção pelo outro lado como ocorre no SAW; e além disso, o último passe apresentou bom acabamento e dimensões, de forma que foi poupado grande quantidade de esmerilhamento.

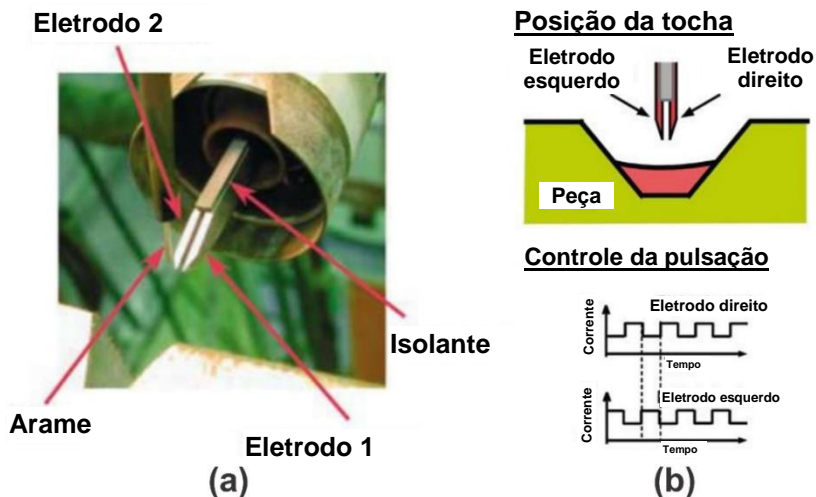


Figura 20 - Tocha de soldagem TIG duplo eletrodo utilizada por Kobayashi et al. [20]

No mesmo trabalho, os autores mostram resultados de medição de pressão de estagnação do arco comparando o processo duplo eletrodo com o TIG convencional. A Figura 21 apresenta um gráfico comparando os maiores valores medidos para diferentes configurações e correntes de soldagem, e a Figura 22 mostra o perfil de distribuição da pressão obtido com o TIG convencional usando 200 A (esquerda), e o TIG-DE usando 100 A em cada eletrodo (direita). Nessa medição, os valores máximos de pressão foram 5 vezes maiores para o processo convencional. Além disso, para ambos os processos a pressão foi maior usando eletrodos com afiação de menor ângulo. Segundos os autores, a menor pressão do arco no processo duplo eletrodo foi o que possibilitou a utilização de correntes totais mais elevadas, sem formação de *humping*.

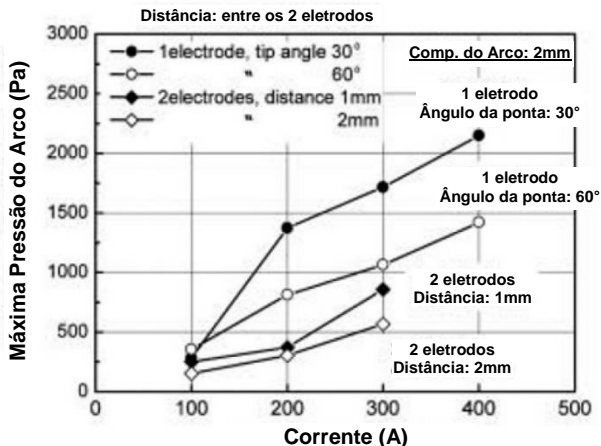


Figura 21 - Resultados de medição de pressão de estagnação, comparando o TIG-DE com o processo de eletrodo único [20]

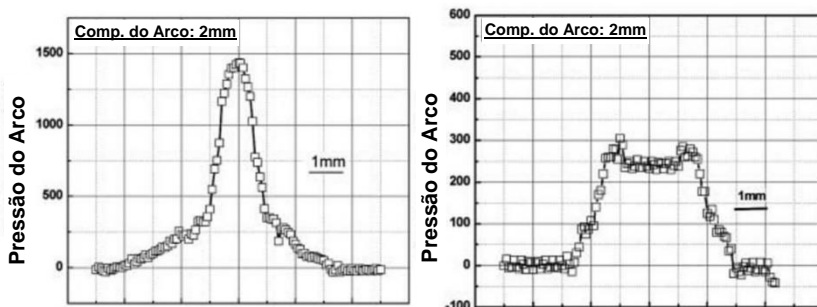


Figura 22 - Perfil de distribuição da pressão do arco. Esquerda: TIG convencional. Direita: Processo duplo eletrodo [20]

O grupo de pesquisadores chinês Leng, Zhang e Wu apresentou trabalhos [21-23] mostrando a influência de alguns parâmetros na pressão do arco formado no processo TIG-DE, como por exemplo: corrente de soldagem, DEP, e distância entre os eletrodos. Para fins de comparação, os autores também realizaram medições utilizando o processo TIG convencional. As informações encontradas nesses trabalhos estão apresentadas nos parágrafos seguintes.

A Figura 23 mostra imagens do arco apresentadas nos trabalhos supracitados, comparando para mesma intensidade de corrente total o

aspecto do arco do TIG convencional, e TIG-DE que no caso utiliza afiação em forma de cunha.

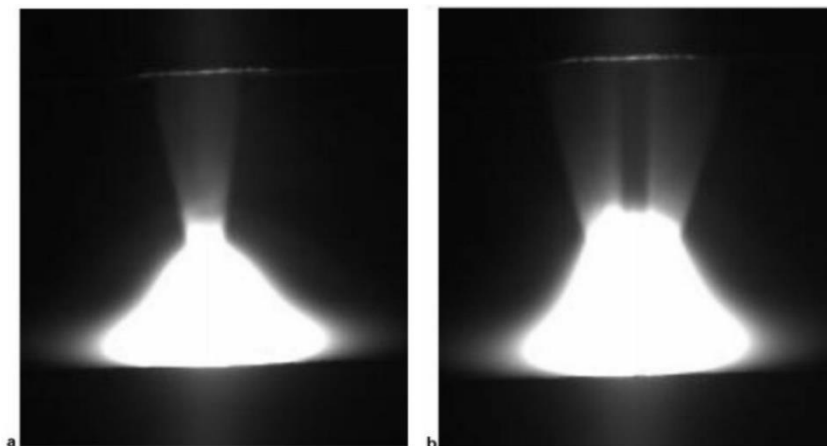


Figura 23 - Aspecto do arco para o processo convencional (esquerda), e para o processo TIG-DE (direita), utilizando a mesma quantidade total de corrente [21]

Os gráficos da Figura 24 mostram os resultados de medição da pressão do arco para o processo TIG convencional (esquerda), e duplo eletrodo (direita) para diferentes níveis de corrente total. É possível observar que os valores da pressão máxima obtida para o TIG-DE foram somente 32%, 22%, e 18% dos os valores máximos obtidos com o TIG convencional para as respectivas correntes totais de 100, 200 e 300 A. A Figura 25 mostra os resultados comparando as duas variantes do processo TIG com diferentes DEP. Esse ensaio mostrou significativa diminuição dos valores para o TIG convencional, resultado que corrobora os resultados de Fan e Shi [12] mostrados na seção 3.3. Para o TIG-DE, os valores da medidos não apresentaram significativa diminuição dos valores máximos a medida que a DEP foi aumentada, mas sim, foi possível notar pequenas mudanças no formato da distribuição.

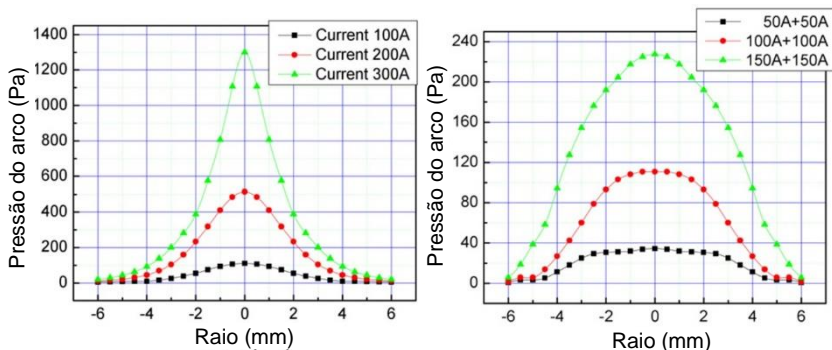


Figura 24 – Resultados de medições mostrando a distribuição da pressão de estagnação do arco com diferentes correntes de soldagem (DEP: 3 mm, Gás: Ar). Fonte: [23] Esquerda: TIG convencional. Direita: TIG-DE com 4 mm de afastamento entre os eletrodos. (Atenção para as diferentes escalas dos gráficos)

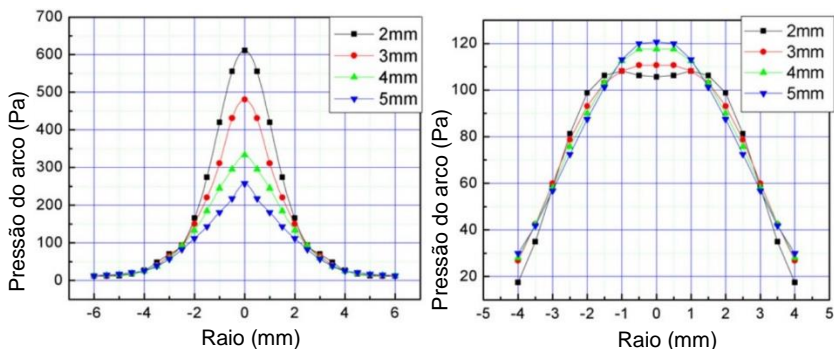


Figura 25 - Resultados mostrando a distribuição da pressão de estagnação do arco com diferentes DEP usando 200 A de corrente total. Fonte: [23] Esquerda: TIG convencional. Direita: TIG-DE com 4 mm de afastamento entre os eletrodos. (Atenção para as diferentes escalas dos gráficos)

A Figura 26 (a) mostra os resultados de medição de pressão para o TIG-DE utilizando diferentes distâncias entre os eletrodos, mostrando uma forte tendência de diminuição dos valores de pressão conforme a distância entre os eletrodos foi aumentada. A Figura 26 (b) mostra a característica estática do arco, para cada eletrodo, mostrando que a tensão do arco foi cerca de 1 V menor para o TIG-DE em comparação com o convencional. Os autores explicam que como um arco está posicionado na atmosfera formada pelo outro arco, então não seria necessário uma tensão mais elevada para transportar os elétrons. Porém, os pesquisadores não especificam se as medições foram obtidas em condição estática ou com a tocha em movimento.

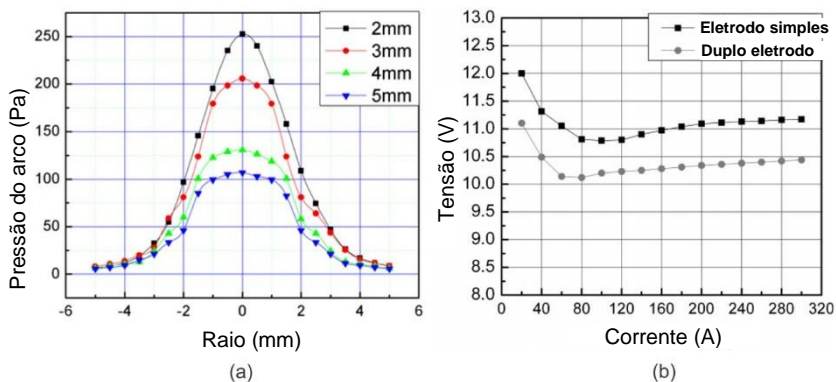


Figura 26 - (a) Resultados de distribuição da pressão de estagnação do arco TIG-DE com diferentes distâncias entre os eletrodos para corrente total de 200 A. [23] (b) Comparação da tensão do arco em cada eletrodo para os processos TIG convencional e duplo eletrodo, Gás: Ar, DEP: 3 mm [22]

Essas publicações relatam ainda dois exemplos de soldagem nos quais o processo que usa duplo eletrodo apresenta melhores resultados do que o TIG convencional. A Figura 27 mostra nos quadros (c) e (d) a aparência do cordão obtido com cada processo (TIG e TIG-DE) em uma soldagem de penetração completa em chapa de aço de 3 mm de espessura, usando corrente total de 300 A e velocidade de soldagem de 0,6 m/min em ambos processos. Os autores destacam a boa aparência e regularidade do cordão feito com o TIG-DE, e destacam os problemas de falta de regularidade, *humping*, mordedura e até mesmo *burning through* do cordão feito com o convencional. Os mesmos resultados são indicados nos quadros (a) e (b), que mostram uma soldagem de chapas de 6 mm de espessura. No quadro (b) a soldagem foi realizada com 200 A em cada eletrodo no processo TIG-DE, e no quadro (a) foi realizada com 300 A usando o TIG convencional. Esses autores destacam que o processo TIG-DE apresenta melhores resultados, pois permite soldagem com maior aporte térmico em relação ao processo TIG convencional, quando a comparação é realizada com os dois processos configurados de modo que seja obtido o mesmo valor máximo de pressão do arco.

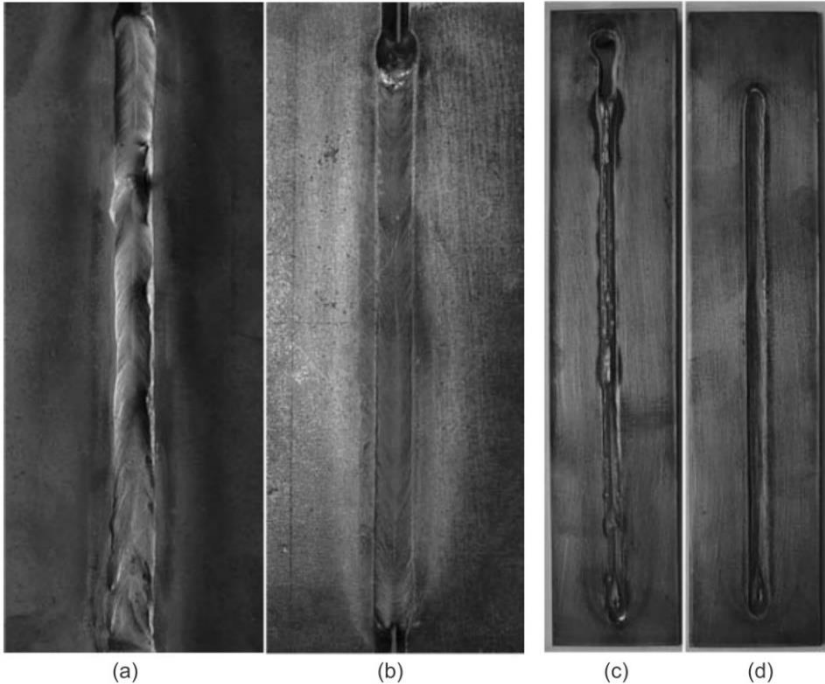


Figura 27 - Resultados de soldagem mostrando melhor desempenho do TIG-DE (cordões (b) e (d)) em comparação com o processo convencional (cordões (a) e (c)) [22]

Os trabalhos de Ogino et al. [24-26] analisaram o comportamento do arco no processo TIG-DE por meio de simulação numérica, dando destaque à influência do afastamento dos eletrodos na velocidade e temperatura do plasma no arco formado. A Figura 28 apresenta resultados desses trabalhos, mostrando a velocidade, direção, e temperatura do plasma para diferentes afastamentos entre a ponta dos eletrodos. É possível notar que o aspecto do arco é fortemente alterado de acordo com a distância utilizada, e também, a forte tendência de atração mútua entre o fluxo de plasma dos dois eletrodos devido a força eletromagnética, que gera uma considerável porção de fluxo em direção contrária a peça.

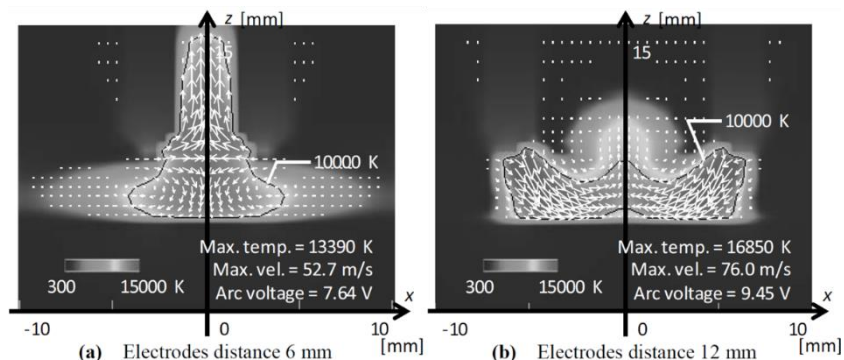


Figura 28 – Simulação da influência no afastamento do eletrodo na temperatura e velocidade e direção do fluxo de plasma para o processo TIG-DE. [26] (DEP: 3 mm, Gás: Ar, I: 100 A cada eletrodo)

Do trabalho [24] destacam-se os gráficos da Figura 29, que descrevem os perfis de distribuição de densidade de calor imposto para diferentes distâncias, a partir dos quais os autores destacam que o valor da máxima densidade de calor imposta não variou significativamente ao modificar a distância entre os eletrodos, e que os picos ficaram posicionados logo abaixo dos eletrodos. Contudo, analisando os dados constantes na Figura 30 [26], os autores apontaram uma considerável variação dos valores máximos da mesma variável. Não há diferenças notáveis entre os dois trabalhos, e os autores não citam que houve modificação na metodologia dos cálculos, e a única diferença encontrada foi que a ponta do eletrodo estava 60° [24] e 90° [26]. Apesar disso os autores não comentam essa diferença, e também não explicam se a afiações do eletrodo que causou a diferença de resultados entre as publicações. Com exceção dessa pequena contradição nos valores de densidade de calor imposto, para as outras características do arco calculadas (pressão do arco e calor aportado total), a variação dos valores apresentaram tendência semelhante nos dois trabalhos.

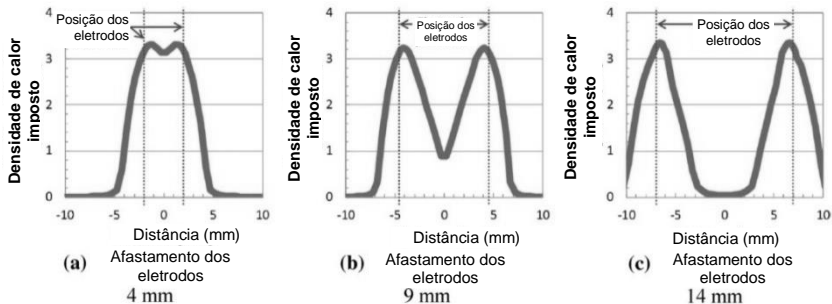


Figura 29 - Perfis de distribuição de densidade de calor imposto calculados para o TIG-DE com diferentes espaçamentos entre a ponta dos eletrodos. [24] (DEP: 3 mm, Gás: Ar, I: 100 A cada eletrodo)

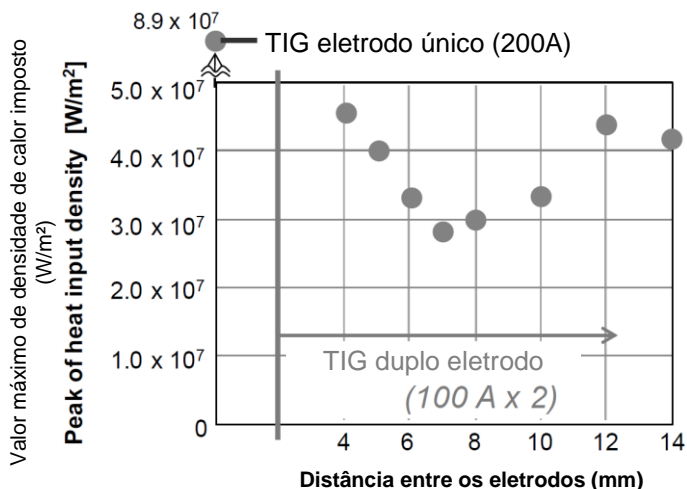


Figura 30 - Valor máximo da densidade de calor imposto calculados para o TIG-DE com diferentes espaçamentos entre a ponta dos eletrodos. [26] (DEP: 3 mm, Gás: Ar, I: 100 A cada eletrodo)

Na Figura 31 são apresentados os perfis de pressão do arco calculados para as distâncias entre a ponta dos eletrodos de 4, 9 e 14 mm, sendo que para a menor distância o perfil apresentou somente um pico, e conforme o espaçamento foi aumentado começou a apresentar dois picos distintos. A Figura 32 mostra os valores máximos da pressão do arco relatados nos trabalhos [24] e [26]. Esses gráficos indicam que a pressão é menor para os menores afastamentos, superando inclusive o valor de pressão do arco do processo com eletrodo único para a mesma corrente. Conforme a distância entre os eletrodos é aumentada até 8 mm, o valor

máximo da pressão atinge os menores valores. Para maiores distâncias o valor volta a aumentar, e tende ao valor do processo de eletrodo único conforme a influência de um arco no outro diminui.

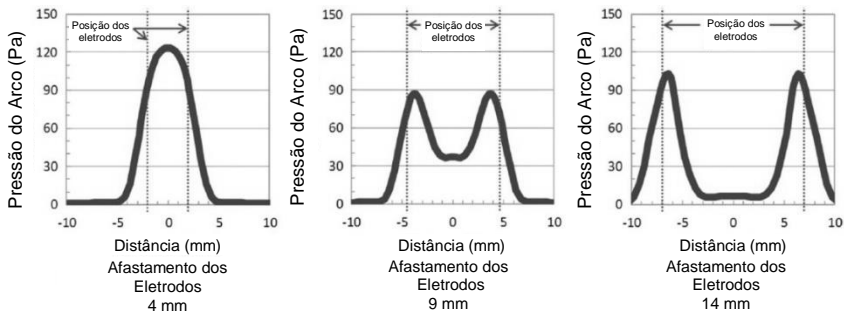


Figura 31 - Perfis de distribuição de pressão do arco calculados para o TIG-DE com diferentes espaçamentos entre a ponta dos eletrodos. [24] (DEP: 3 mm, Gás: Ar, I: 100 A cada eletrodo)

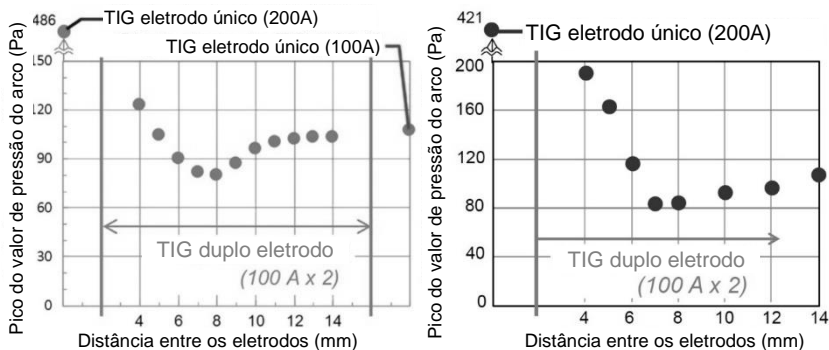


Figura 32 - Valor da pressão máxima do arco para o processo TIG-DE com diferentes distâncias entre os eletrodos, calculado por Ogino et al. (DEP: 3 mm, Gás: Ar). Gráfico da esquerda [24]. Gráfico da direita [26]

Os autores também calcularam o valor do calor imposto total de acordo com a variação da distância entre os eletrodos. Os resultados estão mostrados na Figura 33. Os autores destacam que não houve grande alteração no valor do calor imposto total, e também que os valores calculados para o processo TIG-DE não apresentaram grande diferença em relação ao processo com eletrodo único.

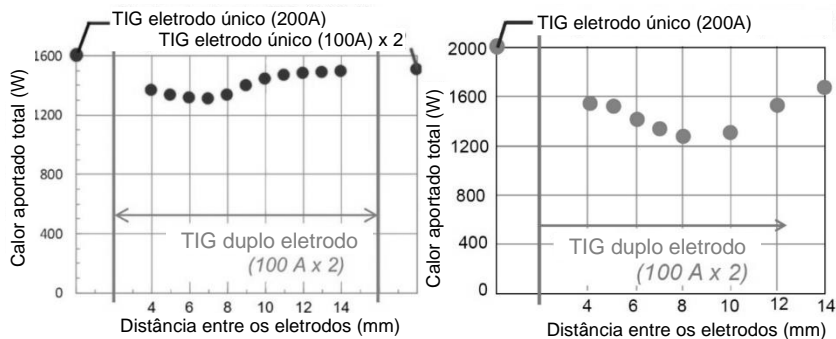


Figura 33 - Valor do calor aportado total para o processo TIG-DE com diferentes distâncias entre os eletrodos, calculado por Ogino et al. (DEP: 3 mm, Gás: Ar). Gráfico da esquerda [24]. Gráfico da direita [26]

Wang et al. [27] sugerem um modelo unificado, baseado em simulação numérica, para descrever a distribuição de temperatura, velocidade e pressão do arco do processo duplo eletrodo, incluindo também análises da dinâmica da poça de fusão, considerando também a inclusão de um gás contendo percentuais de oxigênio ao argônio. Apesar de apresentar várias informações, o trabalho se restringe a praticamente uma configuração apenas do processo, que pode ser visualizada nos resultados exibidas na Figura 34.

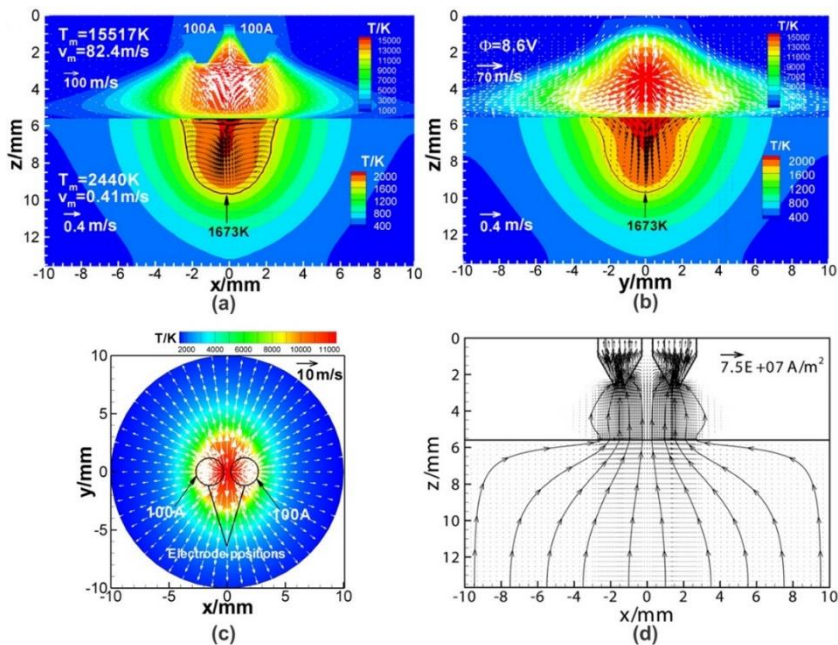


Figura 34 - Análise por simulação numérica do processo TIG-DE realizado por Wang et al. [27] Figuras (a), (b) e (c): Direção, velocidade e temperatura do plasma, sendo em (a) o corte no eixo xz, em (b) o corte no eixo yz e em (c) a vista superior em corte 0,15 mm a cima da superfície do ânodo. Figura (d): Densidade de corrente

Analisando do ponto de vista da aquisição de equipamentos, até recentemente não se conhecia a disponibilidade de equipamentos e sistemas de soldagem TIG-DE comercializados para aplicação industrial. Em outubro de 2013 na feira “*Schweißen und Schneiden*”, foi apresentado pela primeira vez um sistema de soldagem TIG duplo eletrodo, voltado para operações de revestimento. Os fabricantes, em seu material de divulgação [28], usaram a denominação “TIGer” que significaria “*TIG electrically reinforced*”. A Figura 35 mostra o aspecto da tocha de soldagem, que utiliza alimentação com arame quente. Os fabricantes citam em seu material de divulgação que o novo sistema possibilita aumento na taxa de deposição em cerca de três vezes em comparação com o TIG *hotwire* “convencional”, obtendo valores de deposição entre 2,5-6 kg/h, com redução de custos operacionais por kg depositado entre 20 à 50%. Curiosamente, neste sistema, o alinhamento dos eletrodos não era realizado no modo “*tandem*” (um eletrodo atrás do outro em relação ao sentido de soldagem) e tampouco no modo “*twin*” (um ao lado do outro), mas sim com um ângulo de 45° em relação a direção de soldagem.

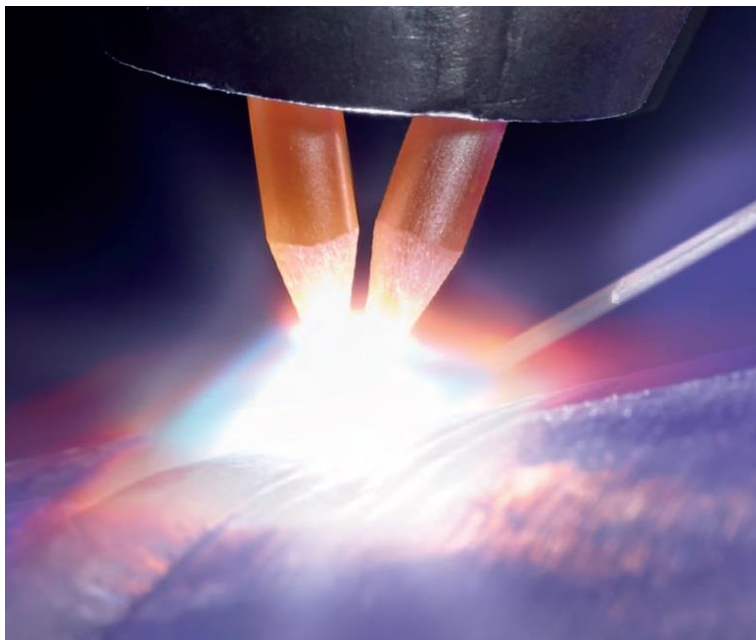


Figura 35 - Imagem de um sistema TIG-DE desenvolvido para operações de revestimento.
Fonte: [28]

5. DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO TIG DUPLO ELETRODO

A tradição dos trabalhos acadêmicos induz a uma divisão explícita entre materiais e métodos, e resultados e discussões. No presente trabalho, o principal “material” utilizado para os estudos, que no caso foi a tocha de soldagem, foi também talvez o principal objeto de estudo e desenvolvimento, e ao mesmo tempo resultado do trabalho. Devido à essa particularidade, a apresentação dos desenvolvimentos do presente trabalho foi elaborada de modo a ter três divisões principais, sendo cada uma ligada especificamente à versão da tocha de soldagem utilizada. Essa foi a forma de apresentação encontrada mais coerente, pois ordena do ponto de vista cronológico, e facilita o entendimento do trabalho. Dentro de cada divisão, estão diluídos a apresentação dos materiais e métodos que foram empregados, e também os resultados e discussões pertinentes. Além disso, na terceira divisão, estão incluídas análises relativas ao processo TIG convencional, mas que também são importantes para a questão da soldagem de elevada produtividade e para o processo TIG-DE.

As 3 divisões são:

- **Ensaios preliminares:** Mostra de maneira bastante resumida as primeiras tentativas de realizar experimentos com o processo TIG usando dois eletrodos em pequenas distâncias. Esses ensaios foram realizados usando equipamentos do processo TIG convencional.

- **Desenvolvimentos com a 1ª versão de tocha TIG-DE:** Mostra o desenvolvimento e os testes com a primeira versão de tocha de soldagem fabricada especificamente para o estudo do TIG-DE. Nesta fase também foi desenvolvida uma fonte de soldagem com funcionalidades próprias para o processo e também foi possível apresentar os primeiros estudos caracterizando o comportamento do arco.

- **Desenvolvimentos com a 2ª versão de tocha TIG-DE:** Mostra o desenvolvimento e os testes com a segunda versão de tocha de soldagem fabricada especificamente para o estudo do TIG-DE, com a qual foi possível estudar o processo visando a utilização de elevada corrente de soldagem. Nesta fase estão apresentados os principais resultados e discussões do trabalho.

5.1. ENSAIOS PRELIMINARES

A fase de ensaios preliminares com o processo TIG Duplo Eletrodo foi documentada de maneira completa no trabalho de Birollo [29] (trabalho de conclusão de curso de graduação). O objetivo inicial do trabalho era estudar o processo TIG-DE visando obter aumento de velocidade de soldagem em relação ao TIG convencional, para a soldagem de chapas de aço. Como ainda não existiam equipamentos específicos para o processo, foram utilizados tochas e fontes usadas no TIG convencional. Ao final do trabalho, não foi possível a obtenção de aumento de velocidade, porém, o trabalho possibilitou constituir um importante conhecimento básico sobre o processo, que foi de grande auxílio para os desenvolvimentos posteriores.

Nos primeiros testes, as tochas foram alinhadas paralelamente uma a outra, formando uma configuração “tandem” com 28 mm de afastamento entre a ponta dos eletrodos. O objetivo era realizar a soldagem de chapas de aço carbono convencional de 3,2 mm de espessura disposta em junta sobreposta, de maneira autógena. Essas tentativas não resultaram em procedimentos que apresentaram vantagem em relação ao processo convencional. A observação na época foi a de que para as condições utilizadas, o cordão formado pelo primeiro eletrodo solidificava com *humping* antes que o segundo arco formado pelo segundo eletrodo pudesse atuar. Além disso, como não se utilizava um sistema AVC, a DEP teve que ser grande nos ensaios, para evitar que o segundo eletrodo colidisse com as protuberâncias do *humping* formado pelo primeiro cordão.

Diante da falta de bons resultados usando as tochas de maneira paralela, decidiu-se realizar testes com as tochas inclinadas, permitindo assim diminuir o afastamento entre os eletrodos. Como já citado na seção 4.1, o pensamento na época era de alguma forma obter um arco alongado com formato elíptico que agisse na mesma poça de fusão. O fato de utilizar duas tochas convencionais já representou por si só uma grande limitação. Devido às dimensões dos bocais cerâmicos utilizados, mesmo inclinando as tochas a menor distância obtida entre a ponta dos eletrodos foi de 13 mm, aproximadamente. A Figura 36 apresenta a configuração de posicionamento das duas tochas para realização dos ensaios, os quais também não proporcionaram como resultado boas soldas. Nessa situação, foi possível verificar um desvio do arco de grande intensidade, conforme foi registrado nas imagens da Figura 37.

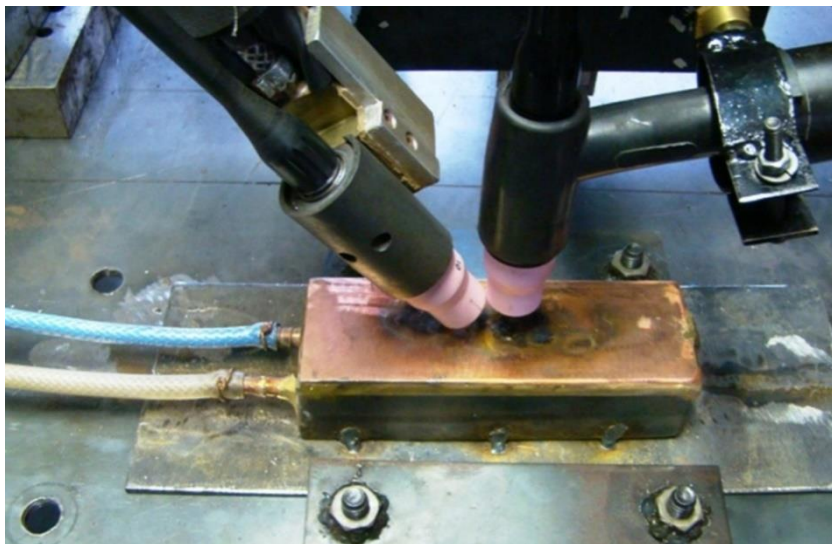


Figura 36 - Imagem dos primeiros ensaios realizados para o estudo do processo TIG-DE [29]

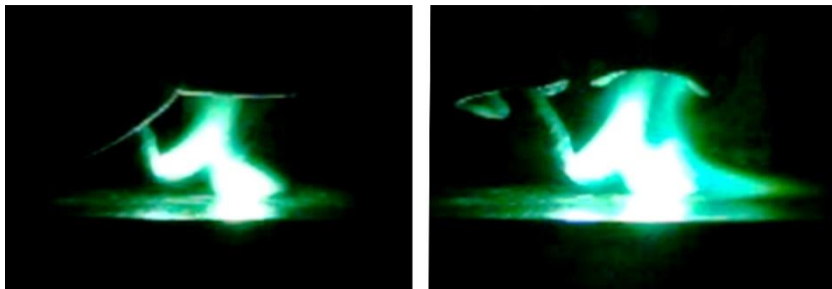


Figura 37 - Desvio magnético do arco nos ensaios realizados com duas tochas de soldagem TIG posicionadas com 13 mm de afastamento entre os eletrodos. Esquerda: 100 A em cada eletrodo. Direita: 200 A em cada eletrodo. [29]

O desvio do arco representa a primeira dificuldade a ser vencida no processo duplo eletrodo, pois o mesmo traz vários problemas, como por exemplo, pronunciada instabilidade, aquecimento dos eletrodos e da tocha de soldagem, e elevada contaminação dos eletrodos. Além disso, o arco, ao ser desviado em uma direção contrária à peça, está deixando de cumprir o objetivo que é promover a fusão do material de base. Foram empreendidas tentativas de utilizar um dispositivo externo para introduzir um campo magnético de forma que o desvio pudesse ser reduzido, porém não foi

possível diminuir o desvio dos arcos de forma adequada, ou se obter uma situação de estabilidade. A Figura 38 mostra a ponteira do oscilador magnético, construído no próprio LABSOLDA, posicionada próxima às tochas de soldagem durante os testes.

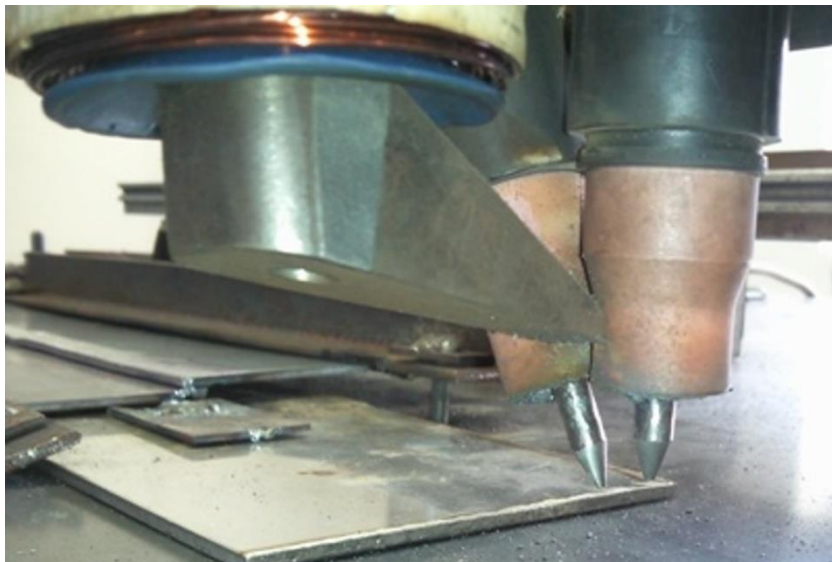


Figura 38 - Tentativa de utilizar um aparato externo para diminuir o desvio do arco no processo TIG duplo eletrodo. [29]

Outra dificuldade enfrentada durante essa fase de ensaios foi a utilização de duas fontes de soldagem convencionais, que não contavam com abertura por pulsos de alta frequência. Por conta disso, a abertura era realizada manualmente por contato de um eletrodo de tungstênio sobressaliente entre o eletrodo e a peça. As fontes contavam com sistema de controle de corrente “*lift-arc*” (que limitam a corrente no momento do contato). Apesar disso, o procedimento com dois eletrodos fazia que a abertura fosse um momento operacionalmente bastante complicado (já que era necessário realizar esse procedimento de encostar eletrodos sobressalientes ao mesmo tempo nos dois eletrodos), e além disso, na maioria das vezes os arcos não iniciavam ao mesmo tempo. Essa experiência mostrou a fundamental importância de se utilizar fontes com abertura por alta frequência (que são pulsos de alta tensão executados em um pequeno período de tempo, sendo suficiente para formar um caminho de gás ionizado e iniciar o processo mesmo com o eletrodo afastado da peça), e também de sincronizar o início do processo.

A dificuldade de trabalhar com duas tochas convencionais, principalmente devido a impossibilidade de regulação apropriada da distância entre os eletrodos também deixou claro a necessidade de fabricação de uma tocha de soldagem dedicada para o estudo com o processo duplo eletrodo.

5.2 DESENVOLVIMENTO COM A 1ª VERSÃO DE TOCHA TIG DUPLO ELETRODO

5.2.1. Tocha de soldagem TIG-DE primeira versão

Com a experiência dos ensaios preliminares, ficou clara a necessidade de construção de uma tocha de soldagem TIG duplo eletrodo que possibilitasse o estudo do processo. O projeto e fabricação de uma primeira versão de tocha TIG-DE foi realizado seguindo os seguintes requisitos:

- Comportar dois eletrodos de tungstênio com potencial isolado.
- Corpo da tocha refrigerado à água.
- Possibilidade de ajuste da distância de afastamento entre os eletrodos.
- Que os dois eletrodos estivessem inseridos em um único bocal de gás de proteção.

A Figura 39 mostra uma projeção em transparência do projeto da tocha, e a Figura 40 mostra o equipamento após fabricado. A tocha foi projetada para utilizar eletrodos de 3,2 mm de diâmetro, posicionados em ângulo de 15°. Esse ângulo entre os eletrodos permitiu obter diferentes distâncias entre os eletrodos, regulando o comprimento do eletrodo que ficava para fora do bocal. A distância máxima entre os eletrodos nessa tocha era de aproximadamente 15 mm. A tocha foi desenhada para utilizar bocais cerâmicos de padrão comercial. Para que os eletrodos não ficassem com proteção gasosa inadequada quando os mesmos eram posicionados com diferentes afastamentos, foi necessário utilizar bocais com diferentes comprimentos. Para isso, era necessário muitas vezes cortar parte dos bocais cerâmicos para que o comprimento do mesmo ficasse adequado.

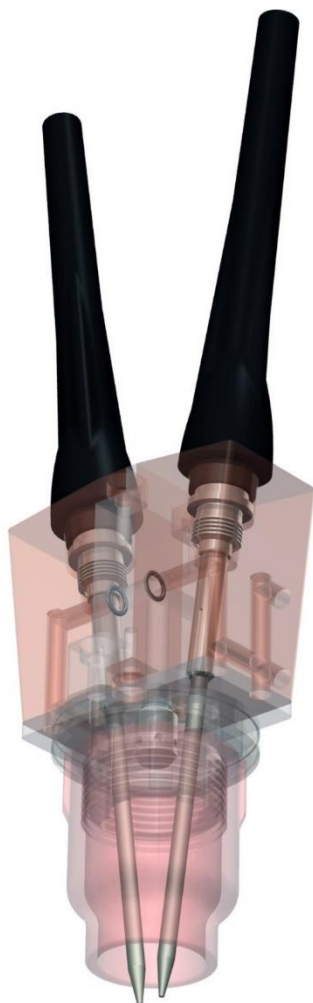


Figura 39 – Renderização com transparência dos componentes mostrando o projeto da primeira versão de tocha TIG duplo eletrodo projetada pelo LABSOLDA-UFSC

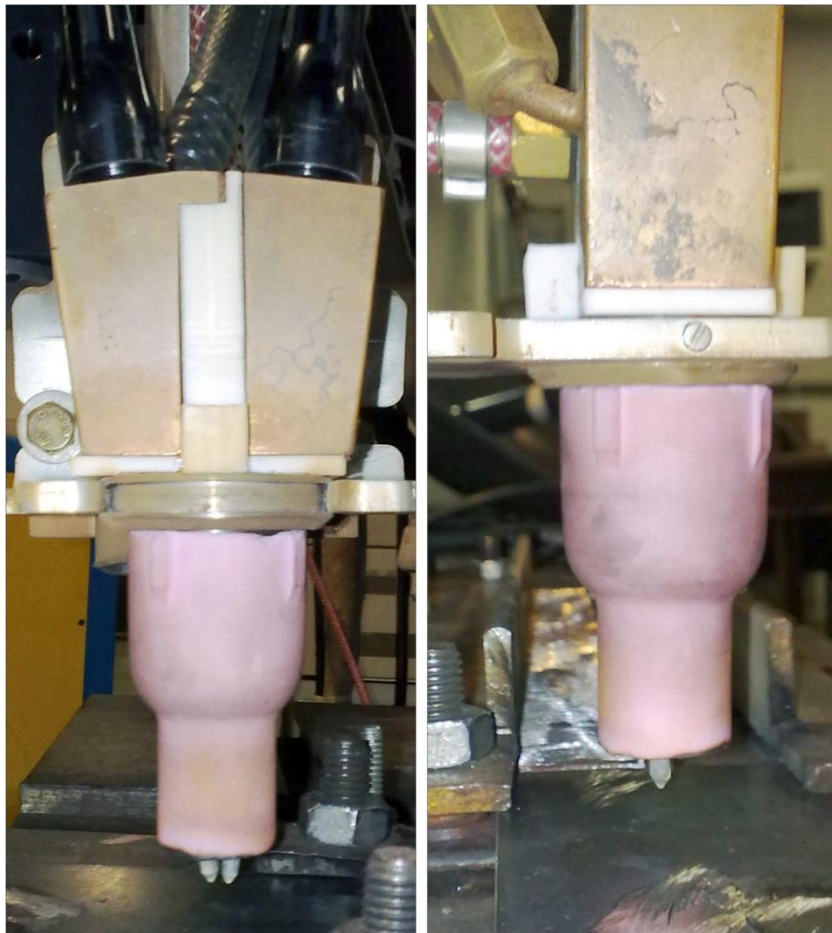


Figura 40 – Imagens da primeira versão de tocha TIG duplo eletrodo projetada e construída pelo LABSOLDA-UFSC

5.2.2. Fonte de soldagem TIG duplo eletrodo

Considerando as dificuldades encontradas na fase de ensaios preliminares devido à necessidade de utilização de duas fontes de soldagem convencionais sem a adequada integração, percebeu-se que para possibilitar o estudo do processo TIG-DE de forma adequada seria necessário uma atenção especial com relação ao equipamento de soldagem. Nesta questão, o modelo de desenvolvimento que o LABSOLDA-UFSC

adotou ao longo dos anos, aliando empresas “*Spin-Off*”, possibilitou a estrutura tecnológica que permite realizar as customizações necessárias no equipamento de soldagem para o desenvolvimento de novas modalidades. Existia a possibilidade de continuar usando duas fontes, ou tentar adicionar mais uma saída de corrente em uma das fontes de soldagem produzidas pela IMC. Como nas duas soluções seriam necessários o projeto de circuitos eletrônicos e alteração dos programas das fontes, foi decidido por adicionar mais uma saída a fonte de soldagem que nesse caso se mostrou superior do ponto de vista técnico. As vantagens desta opção são a redução de cabos e conexões, menor espaço físico ocupado, redução de custos e principalmente, a maior facilidade de controle das correntes, sendo realizado por uma único programa/CPU, não necessitando a utilização de meios de comunicação entre duas fontes. Caso fosse escolhido trabalhar com duas fontes, seria possível obter um menor custo inicial e talvez um menor tempo necessário para colocar o sistema em operação, porém, haveria maior dificuldade para se obter adequada sincronização, tendo como tarefas adotar protocolos de comunicação, verificar os tempos de resposta, e providenciar a criação de um meio físico, isolamento, e outros fatores que são significativos no interfaceamento de dois equipamentos.

A fonte foi projetada com gabinete e unidade de controle eletrônico únicos, com duas saídas de corrente isoladas com capacidade de corrente de até 450 A cada. Com relação à estrutura de potência, a fonte é chaveada no secundário e utiliza transistores tipo IGBT, e utiliza um transformador enrolado com duas saídas isoladas (fabricado especialmente para essa aplicação). A Figura 41 mostra a fonte que foi desenvolvida.



Figura 41 - Fonte de soldagem IMC Digiplus A7 em versão desenvolvida para o processo TIG duplo eletrodo em parceria com o LABSOLDA-UFSC

A fonte conta com regulagem digital e individual dos parâmetros de soldagem por meio do display de LCD, com ajustes de rampas de subida e descida, corrente de finalização, tempos de pré e pós gás. Cada saída de corrente possui regulagem individual dos valores de corrente, conforme mostrado na Figura 42, podendo utilizar corrente pulsada de onda retangular, com possibilidade de ajuste de tempos na escala de segundos (com regulagem em incrementos de 0,1 s) e escala de milissegundos (com regulagem de incrementos de 0,1 ms). Os tempos de pulso e de base podem ser regulados com valores diferentes, mas sempre de maneira idêntica para as duas saídas. Nesse caso, a escolha de utilizar um único processador controlando a forma de corrente das duas saídas permitiu sincronizar não só o início e fim da soldagem, mas também sincronizar o pulso e a base nas duas saídas. Para isso, foi implementado também uma variável para se regular o tempo de defasagem das duas saídas, permitindo assim combinações em fase, parcialmente defasado, ou totalmente fora de fase.

Outro requisito importante para o processo TIG-DE que foi atendido nessa fonte, foi o duplo sistema de abertura do arco por pulsos de alta frequência, o qual contava com um ignitor separado para cada saída de corrente. Durante os primeiros testes da fonte, foi possível notar que ocasionalmente, somente um dos arcos se estabelecia. Para evitar que a soldagem continuasse com apenas um dos arcos ligados, foi desenvolvido

e implementado no software de controle da fonte um sistema inteligente de abertura. Neste caso, após a execução dos pulsos de alta frequência para a abertura dos arcos, a fonte de soldagem aguarda um tempo de 0,1 s e verifica se existe corrente nas duas saídas. Caso exista corrente, a fonte entende que o processo iniciou adequadamente (situação que foi denominada como “arco bom”) dando início ao procedimento de soldagem conforme programado. Caso não exista corrente em um dos eletrodos, a fonte apaga o arco e imediatamente realiza um novo ciclo de pulsos de alta-frequência para abrir os dois arcos. Isso é importante para garantir que o processo não inicie a soldagem da peça com somente um dos arcos aberto. Essa função, que monitora no momento de abertura se os dois arcos iniciaram corretamente, foi aproveitada para disponibilizar um sinal de “arco bom”, através de uma saída digital isolada colocada em um conector na parte traseira da fonte. O sinal de “arco bom” foi utilizado como disparo na interface com os outros dispositivos, como os dispositivos de movimentação da tocha, robô de soldagem e sistemas de aquisição de dados.

Menu de ajuste da corrente de soldagem



Menu de ajuste de configurações



Figura 42 - Janelas de regulagem de parâmetros da fonte IMC Duplus A7 versão TIG Duplo Eletrodo

5.2.3. Testes de soldagem

Com o desenvolvimento da primeira versão de tocha TIG-DE, e da fonte de soldagem, foi possível iniciar de fato um estudo do processo com as condições mínimas necessárias. A primeira questão avaliada foi o comportamento do arco com diferentes distâncias entre os eletrodos, uma vez que nos ensaios do capítulo anterior foi observado forte desvio do arco usando cerca de 13 mm de distância entre os eletrodos.

A Figura 43 mostra uma sequência de imagens do arco caracterizando o forte desvio do arco utilizando 8 mm de afastamento entre a ponta dos eletrodos e 200 A de corrente constante em soldagem tipo

cordão sobre chapa em aço carbono. As imagens do arco foram feitas usando uma câmera fotográfica com configuração manual para manter a mesma exposição em todas as fotos (tempo de exposição fixo: 1/3 s, e mesma abertura de diafragma: F/9), e um filtro de máscara de solda padrão DIN GS 0196 n°11 posicionado na frente da lente.

Nesta sequência de imagens é possível notar o forte desvio do arco em direção contrária à peça na região entre os dois eletrodos, e o aquecimento gradual dos eletrodos. No quadro n°6 é possível notar certa instabilidade do arco nessa região de desvio do arco. A partir do quadro n°8 é possível notar a formação de um “arco duplo”, onde o arco do eletrodo que estava à esquerda passa a se ancorar no outro eletrodo ao invés da peça. Esse fenômeno foi atribuído ao grande aquecimento dos eletrodos na região central da tocha, fazendo com que a temperatura na lateral do eletrodo fosse elevada o suficiente para que o ponto catódico do arco fosse deslocado para a lateral do eletrodo pelas forças eletromagnéticas. Nos quadros seguintes é possível verificar que o eletrodo à direita sofreu grande aquecimento por conta do arco duplo, enquanto o eletrodo à esquerda aparenta uma temperatura menor.

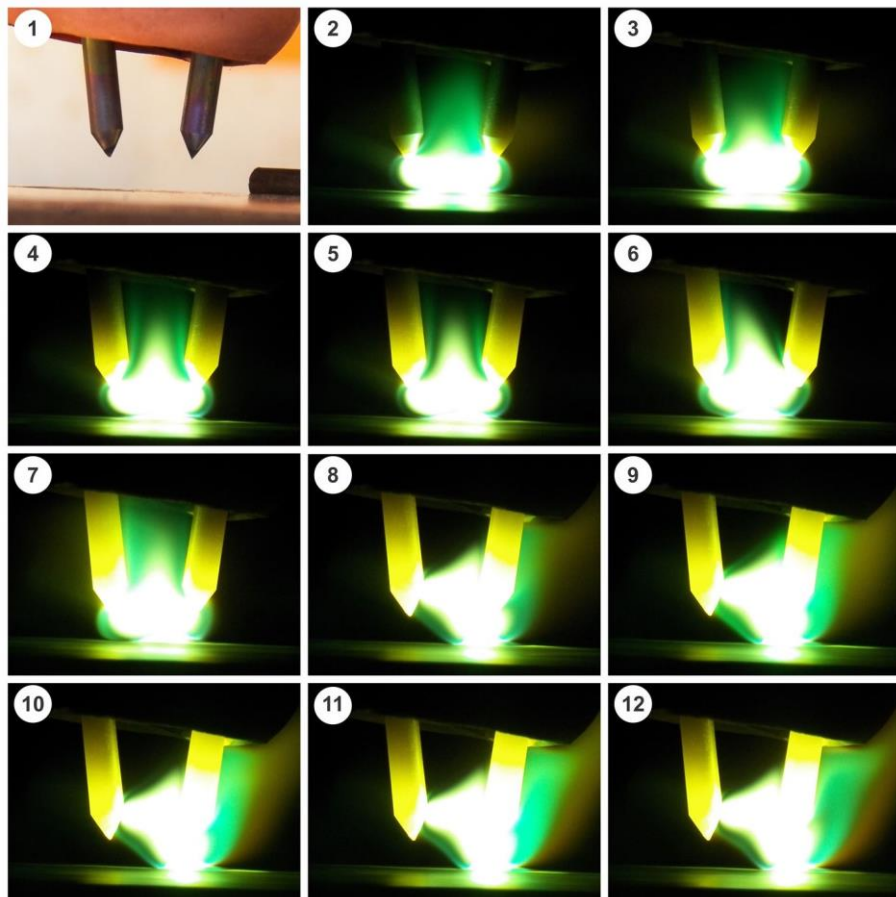


Figura 43 - Sequência de imagens (sequência cronológica) mostrando o desvio do arco no processo TIG-DE, que ocasionou a formação de um arco duplo. (Corrente: 200 A em cada eletrodo. Gás de proteção: Argônio. Velocidade de soldagem: 0,5 m/min. Metal de base: Aço carbono. Tempo de exposição da imagem de 1/3 s. Sentido de deslocamento em todas imagens ←)

Essa sequência de imagens caracteriza muito bem os problemas de utilizar o processo TIG-DE em situações onde o desvio do arco é significativo. Os principais problemas verificados foram:

- Instabilidade do arco: nessa situação de grande desvio, os arcos não estão em uma situação de boa estabilidade, sendo que foi observado grande facilidade de desvio para diferentes direções devido a diversos fatores (diferença de massa da peça, posição do cabo terra, etc), que

normalmente não afetariam o processo TIG convencional. Isso pode ser caracterizado como baixa rigidez do arco.

- Degradação dos eletrodos: o desvio do arco causa excessivo aquecimento e também promove facilmente a contaminação dos eletrodos. Uma suposição seria que o jato de plasma quando desviado em direção contrária à peça carregue uma grande quantidade de vapores metálicos oriundos da peça.

- Degradação da tocha de soldagem: da mesma forma que aquece os eletrodos, o desvio do arco também aquece o bocal e corpo da tocha, podendo danificar esses componentes da tocha.

- Perda de eficiência de fusão: mesmo antes de realizar uma análise específica, parece lógico afirmar que o desvio de uma significativa porção do arco em direção contrária à peça significa naturalmente capacidade de gerar fusão do arco sendo desperdiçada.

Dessa forma, o posicionamento relativo entre os eletrodos é de extrema importância para o processo. De maneira geral, com a experiência com o processo TIG-DE surgiram duas soluções para diminuir o efeito do sopro magnético. A primeira é a utilização de pequenas distâncias entre os eletrodos. De maneira geral, quanto menor for o afastamento entre os eletrodos, menor será a tendência de desvio, devido às próprias questões geométricas. Dessa forma, usando um pequeno afastamento, é possível diminuir o desvio à níveis que não comprometem a soldagem. A Figura 44 mostra uma imagem usando as mesmas condições de soldagem da Figura 43, porém, com afastamento entre a ponta dos eletrodos em 4 mm (resultando em um distanciamento efetivo de aproximadamente 1,5 mm entre os eletrodos). É possível verificar que o desvio do arco não impossibilita a utilização do processo, já que a porção do arco desviada é muito pequena.

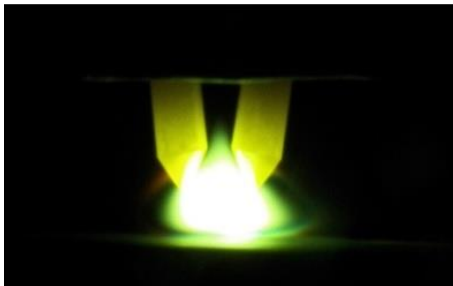


Figura 44 - Aspecto do arco formado com TIG duplo eletrodo com afastamento de 4 mm entre as pontas dos eletrodos. (I: 200 A em cada eletrodo; Gás de prot.: Ar; Vs: 0,5 m/min; Metal de base: Aço carbono; Tempo de exposição da imagem de 1/3 s; deslocamento ←)

A segunda técnica, que pode ser denominada pulsado sincronizado fora de fase, possibilita a redução do desvio do arco com o processo TIG-DE com qualquer afastamento entre os dois eletrodos. Como o nome sugere, a técnica consiste em realizar a soldagem de maneira pulsada nos dois eletrodos, utilizando tempos de pulso e de base iguais, com sincronismo entre o período de pulso em um eletrodo, e a base no outro eletrodo. Essa metodologia possibilita diminuir grandemente os efeitos indesejados do sopro magnético, mas para que tenha maior eficácia, é fundamental que a corrente de base utilizada nos dois eletrodos seja a mais baixa possível, como por exemplo, 30 A. Como consequência, para que o valor da corrente média seja suficientemente grande é necessário usar uma intensidade de corrente bastante elevada no pulso. Nessa situação, o arco que está na corrente de pulso praticamente não é desviado. Ao mesmo tempo, o arco que está na fase de base é fortemente desviado, mas como sua intensidade de corrente é baixa, o desvio de arco gerado tende a não prejudicar a operação com o processo. A Figura 45 mostra essa situação onde o eletrodo da direita está com corrente de pulso de 350 A, enquanto o eletrodo da esquerda está no período de base com 50 A.

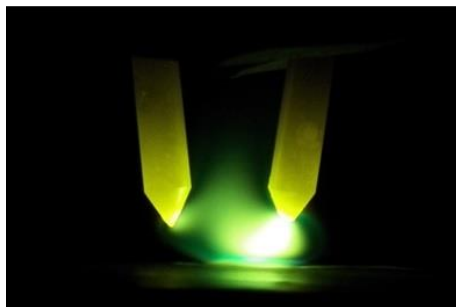


Figura 45 – Aspecto do arco do TIG-DE onde o eletrodo da direita está no período de pulso com 350 A, o eletrodo da esquerda está no período de base com 50 A. (Tempo de exposição da imagem de 0,05 s; Sentido de deslocamento ←)

A Figura 46 mostra a comparação do desvio do arco com a técnica do pulsado sincronizado fora de fase (imagens b e c), com a condição usando corrente constante nos dois eletrodos (imagens a e b). Nesse caso, as distâncias entre a ponta dos eletrodos foram 8 e 12 mm. A corrente total regulada em todos os casos (considerando a soma da corrente dos dois eletrodos) é 400 A. É possível notar o forte desvio do arco para a técnica convencional, de forma que não seria viável aplicar o processo nessa situação. No caso da técnica pulsada, o desvio do arco é muito menor, e cada arco se estabelece preferencialmente em direção à peça.

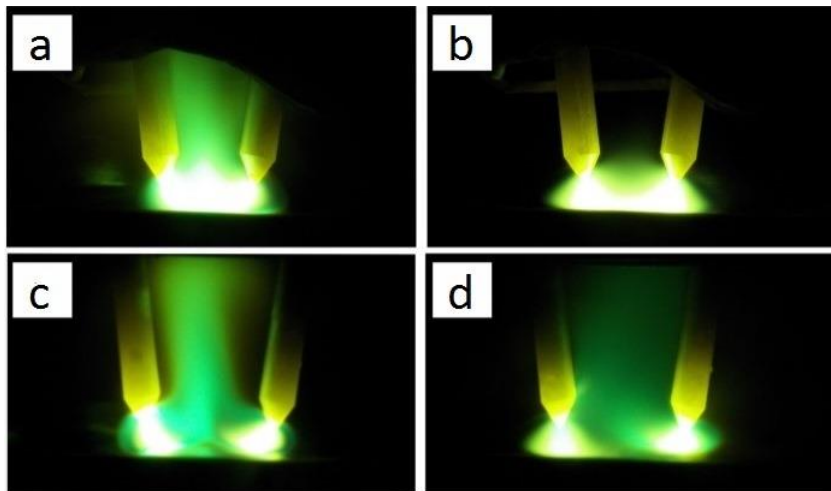


Figura 46 - Comparação do desvio do arco entre a técnica convencional com 200 A de corrente constante em cada eletrodo (imagens “a” e “c”), e a técnica pulsado sincronizado fora de fase com 350 A no pulso e 50 A na base, e 0,1 s de t_p e t_b (imagens “b” e “d”). (Distância entre os eletrodos: 8 mm (a e b) 12 mm (c e d); Tempo de exposição das imagens 1/3 s; Gás de proteção: Ar; Vs: 0,5 m/min; Metal de base: Aço carbono; Sentido de deslocamento ←)

Apesar do pulsado sincronizado fora de fase poder ser apontado como alternativa para o problema do desvio do arco, deve-se levar em consideração seus efeitos negativos, principalmente quando se imagina a aplicação em situações de elevada velocidade que estão sujeitas ao aparecimento de *humping*. Ao utilizar uma corrente de base de baixa intensidade, torna-se necessário um valor elevado no pulso para que se tenha um valor de corrente média adequado. Considerando essas aplicações de elevada velocidade, é normal a utilização de correntes de 350 A em cada eletrodo, necessitando assim a utilização de pulsos com 650 A se a base for 50 A, por exemplo. Dessa forma, um valor elevado de corrente naturalmente tende a apresentar elevada pressão do arco, induzindo a formação de *humping* com maior facilidade.

Com relação à frequência de pulsação, a utilização da técnica do pulsado sincronizado fora de fase também enfrenta limitações. Quanto maior for a frequência, menor será a eficiência devido aos atrasos na subida e na descida da corrente causadas pela indutância interna da fonte em conjunto com os cabos de alimentação. Esse atraso pode ser exemplificado no oscilograma de corrente mostrado na Figura 47. É possível notar que o tempo de descida da corrente é muito maior que o tempo de subida. Para uma corrente de aproximadamente 300 A, o equipamento utilizado

apresentou aproximadamente 6 ms de tempo de descida, enquanto o tempo de subida ficou na faixa de cerca de 1,5 ms. Dessa forma, em cada período de transição de corrente passa existir um tempo onde os dois arcos estão com corrente relativamente elevada. Esse tempo ocupará um maior percentual do período total, quanto maior for a frequência de pulsação. Logicamente, esse atraso de descida da corrente depende também da arquitetura da unidade de potência da fonte. A condição da fonte utilizada no presente trabalho retrata o que se obtém tipicamente nas fontes de soldagem, mas existe a possibilidade construir uma unidade de potência mais elaborada que consegue no mínimo repetir na descida a mesma dinâmica do que na subida.

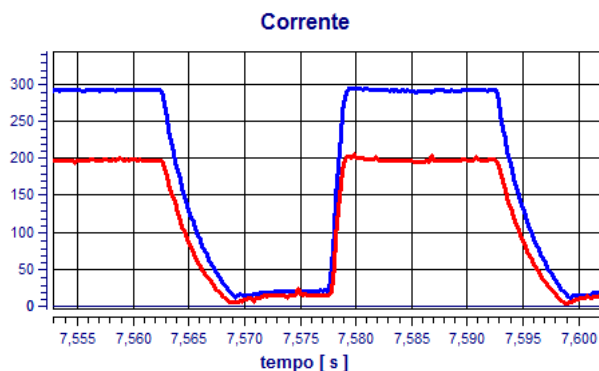


Figura 47 - Oscilograma de corrente mostrando a diferença nos tempos de subida e descida da corrente

A Figura 48 mostra oscilogramas da corrente, ilustrando o efeito do atraso na dinâmica da corrente para 3 frequências de pulsação diferentes (2,5; 25 e 250 Hz), cada uma com uma ordem de grandeza 10 vezes maior do que a outra, e a Figura 49 exhibe uma imagem do arco em cada condição. É possível verificar que para 2,5 Hz o tempo de sobreposição com corrente elevada é quase insignificante em relação ao período total. Quando a frequência passa para 25 Hz esse tempo aumenta para cerca de 1/5 do período total, e na imagem correspondente do arco já é possível notar um pouco mais de desvio do arco na região central entre os eletrodos. Usando 250 Hz, os tempos de pulso são menores do que o próprio tempo que a fonte demora para diminuir a corrente, de forma que os dois arcos permanecem constantemente com uma corrente relativamente elevada. Na imagem do arco correspondente à essa situação, é possível verificar o significativo desvio do arco na região central da tocha.

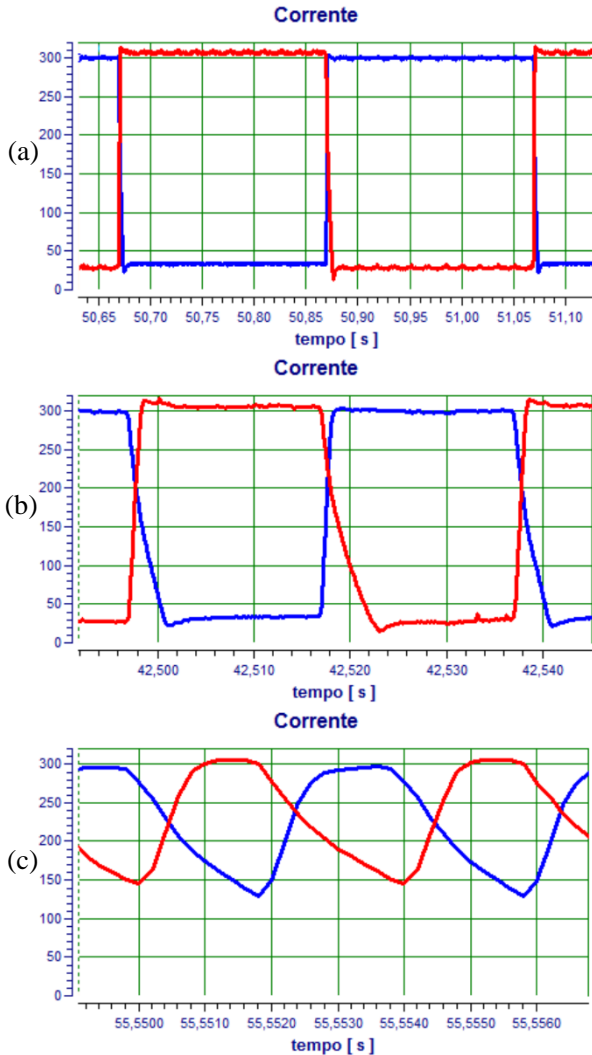


Figura 48 – Oscilogramas da corrente para o processo TIG-DE usando a técnica pulsado sincronizado fora de fase com 300 A de corrente de pulso e 30 A de corrente de base e diferentes frequências de pulsação: (a) 2,5 Hz (b) 25 Hz (c) 250 Hz

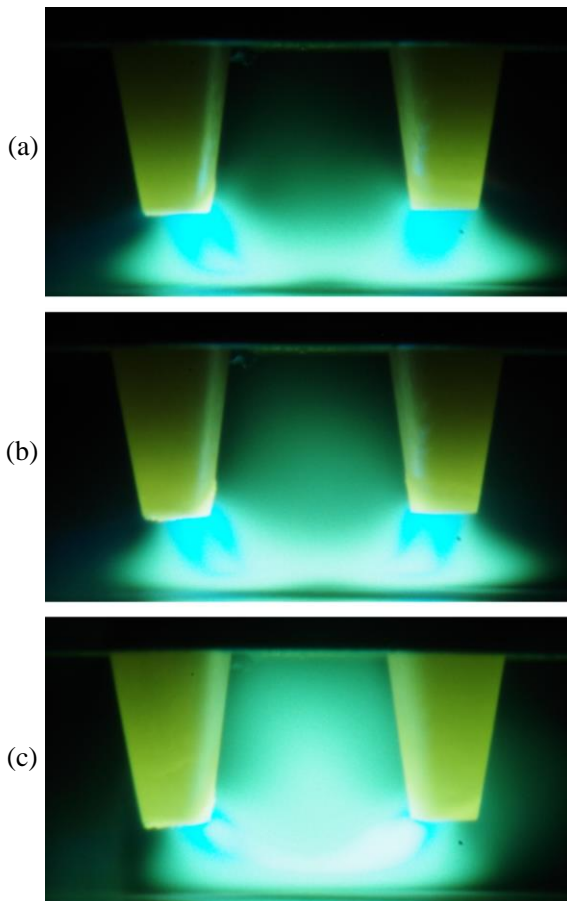


Figura 49 – Imagens do arco usando o processo TIG-DE com a técnica pulsado sincronizado fora de fase com 300 A de corrente de pulso e 30 A de corrente de base e diferentes frequências de pulsação: (a) 2,5 Hz (b) 25 Hz (c) 250 Hz. Tempo de exposição de cada imagem: 0,4 s

Com a fabricação da 1ª versão da tocha duplo eletrodo, além do estudo das características do arco, a intenção era realizar desenvolvimento de procedimentos para soldagem de chapas de aço com 3 mm de espessura, e também testes de soldagem tipo cordão sobre chapa para comparar o TIG-DE com o processo convencional. Esse trabalho foi iniciado, mas não pôde ser conduzido da maneira desejada por problemas na tocha. O principal problema verificado foi a questão da utilização do bocal cerâmico, pois existia a necessidade de dispor de bocais com diferentes comprimentos para atender as variadas combinações de distâncias utilizadas. Apesar de

existirem alguns bocais com diferentes comprimentos disponíveis comercialmente, os modelos encontrados não atendiam plenamente a necessidade. Dessa forma, era necessário cortar os bocais para obter as geometrias desejadas. Essa operação de corte (feita com uma serra circular com disco para cortar cerâmica) era muito difícil de ser realizada pois os bocais quebravam frequentemente. Na média, a cada três tentativas de corte era possível obter somente um bocal inteiro e o acabamento dos bocais cortados inevitavelmente ficava irregular. Além da dificuldade de “fabricação” desses bocais, o problema principal foi o aquecimento excessivo durante a soldagem, sendo que várias vezes os bocais quebravam ao final de um ensaio.

O diâmetro de eletrodo usado também acabou sendo um problema à medida que se estava utilizando correntes de soldagem maiores do que 300 A em cada eletrodo. Devido ao projeto da tocha, a distância entre o ponto de contato do eletrodo no corpo da tocha e a ponta do eletrodo ficou relativamente grande (para um afastamento de 4 mm entre as pontas dos eletrodos, essa distância era de mais de 60 mm). Dessa forma, a capacidade de troca de calor entre o eletrodo e a o corpo da tocha ficava bastante reduzida. Adicionalmente, o calor gerado por efeito Joule, e a tendência natural de desvio do arco do processo duplo eletrodo aquecer o eletrodo, resultavam na prática em um aquecimento excessivo dos eletrodos, os quais oxidavam facilmente durante o uso.

Com esses problemas, ficou clara a necessidade de desenvolvimento de uma nova tocha de soldagem. Os testes realizados com a 1ª versão de tocha TIG-DE ficaram registrados no trabalho de Martins [30] (trabalho de conclusão de curso de graduação). Nessa etapa do desenvolvimento, foram realizados ensaios de soldagem de chapas de aço com 3 mm de espessura em junta sobreposta. O objetivo era obter procedimentos em elevada velocidade de soldagem (superior à 1 m/min), porém, não foram obtidos melhores resultados em comparação com o TIG usando eletrodo único. Apesar dos problemas que dificultaram a realização de um trabalho mais aprofundado com a 1ª versão da tocha TIG-DE, resultados promissores foram obtidos nos testes tipo cordão sobre chapa. Esses testes indicaram que o processo duplo eletrodo apresenta potencial para aumento de produtividade em aplicações de soldagem de elevada velocidade, e motivaram também a construção da segunda versão de tocha TIG-DE. A Figura 50 mostra um exemplo de uma comparação do TIG-DE com o processo convencional, realizada com um ensaio tipo cordão sobre chapa com 3 velocidades diferentes ao longo do cordão (movimentação realizada utilizando um robô antropomórfico). No caso da soldagem com eletrodo único utilizando corrente de 300 A, ocorreu *humping* em toda a extensão

do cordão, mesmo na velocidade de soldagem de 50 cm/min. Usando o TIG-DE nas mesmas condições, foi possível utilizar 200 A de corrente constante em cada eletrodo (400 A no total), e não ocorreu o surgimento de discontinuidades mesmo em velocidade mais elevada (70 cm/min). Nesse teste foi utilizada corrente constante e afastamento de 4 mm entre as pontas dos eletrodos. É interessante ressaltar que o cordão realizado com o TIG-DE nessa situação apresentou um notável desvio do arco, principalmente no início e no fim do cordão. Esse desvio foi atribuído à maneira que a chapa foi presa na mesa de soldagem, usando pequenos pedaços de chapa de aço nas laterais, conforme mostrado na Figura 51. Esses desvios no cordão resultante indicam mais uma vez a uma maior sensibilidade do arco (ou baixa rigidez do arco) no processo duplo eletrodo.

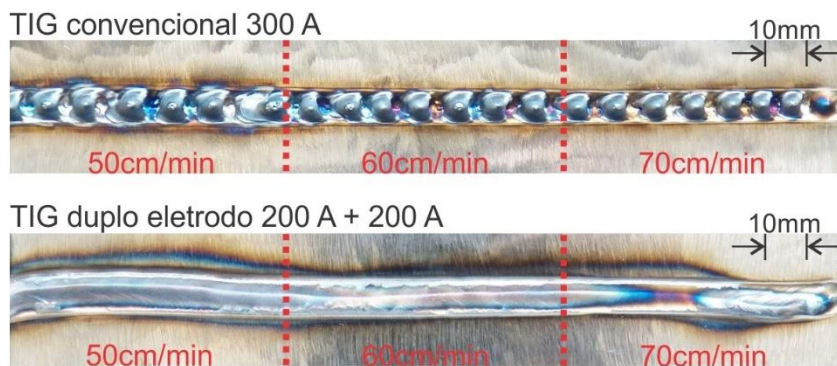


Figura 50 - Ensaio de soldagem tipo cordão sobre chapa com diferentes velocidades no mesmo cordão. Imagem superior: Processo TIG convencional com 300 A. Imagem inferior: Processo TIG-DE, com 4 mm de distância entre a ponta dos eletrodos e corrente de soldagem de 200 A em cada eletrodo

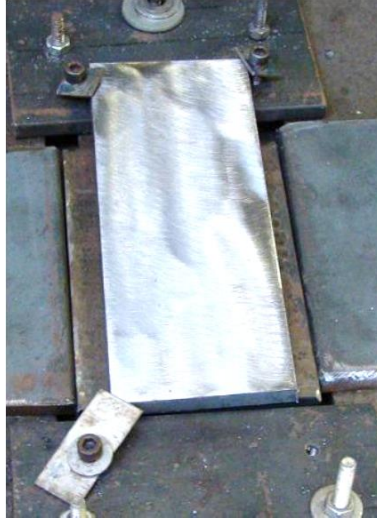


Figura 51 – Imagem mostrando a fixação do corpo de prova na mesa de soldagem utilizado nos ensaios cordão sobre chapa

5.3. DESENVOLVIMENTO USANDO A 2ª VERSÃO DE TOCHA TIG DUPLO ELETRODO

5.3.1. Tocha de soldagem TIG-DE segunda versão

A experiência obtida durante o trabalho realizado com a 1ª tocha revelou a necessidade de projetar e fabricar uma nova versão de tocha de soldagem TIG duplo eletrodo. O projeto da segunda versão de tocha TIG-DE foi realizado seguindo os seguintes requisitos:

- Comportar dois eletrodos de tungstênio com potencial isolado.
- Usar eletrodos com diâmetro adequado para correntes elevadas.
- Corpo da tocha refrigerado à água.
- Possibilidade de ajuste da distância e ângulo entre os eletrodos, de forma que não seja necessário elevada distância entre o ponto de contato do eletrodo com a tocha.
- Que os dois eletrodos estivessem inseridos em um único bocal de gás de proteção.
- Bocal de proteção metálico rosqueado em uma peça refrigerada por água.

O projeto da segunda tocha partiu da especificação do diâmetro para os eletrodos. A escolha teve como critério a experiência de soldagem TIG

em elevada velocidade (mostrada no trabalho [1]), onde o eletrodo de 6,4 mm (1/4") não apresentou problemas ou sinais de desgaste excessivo utilizando correntes médias da ordem de 500 A. Dessa forma, como no processo TIG-DE a corrente em cada eletrodo estava limitada à 450 A (corrente máxima de cada saída da fonte), foi decidido que poderia ser utilizado um eletrodo de bitola menor. Dessa forma, foi selecionado o eletrodo de 4,8 mm, que é o eletrodo de maior diâmetro comercialmente disponível abaixo do 6,4 mm.

Para que os eletrodos pudessem ser posicionados com maior liberdade, a tocha foi projetada com possibilidade de movimentação das peças de cobre (refrigeradas à água) que seguram os eletrodos dentro do corpo da tocha. Para cada eletrodo foram projetadas quatro posições de fixação, sendo que cada posição era mantida por dois parafusos de cada lado do corpo da tocha. A Figura 52 mostra as 4 possibilidades de fixação que resultam em duas posições com os eletrodos paralelos um aos outros, e duas posições inclinadas, com ângulos de 10° e 20° entre os eletrodos. Além da possibilidade de combinação dessas 4 posições, também é possível usar qualquer posição intermediária, porém nesses casos, a fixação é feita somente encostando os parafusos na face das peças de cobre que seguram os eletrodos (resultando em uma fixação suficiente para manter a posição dos eletrodos durante os ensaios).

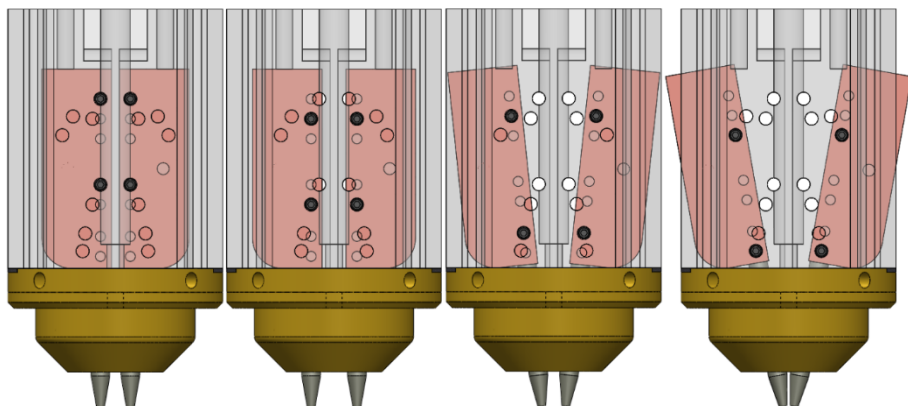


Figura 52 - Desenhos esquemáticos mostrando as 4 posições padrão para cada eletrodo na 2ª versão de tocha de soldagem TIG-DE desenvolvida pelo LABSOLDA - UFSC

O bocal da tocha foi fabricado em latão, possibilitando assim a obtenção de diferentes geometrias dos bocais conforme necessário. A peça na qual o bocal era rosqueado recebia refrigeração por água, e foi prevista

uma área de superfície relativamente grande para troca de calor com o bocal, para facilitar o resfriamento do mesmo.

O desenho do difusor de gás (fabricado também em latão) foi planejado buscando obter uma distribuição de gás homogênea e eficiente. Durante a fase do projeto da tocha foram utilizadas ferramentas de simulação numérica para analisar o fluxo de gás de diferentes concepções. A Figura 53 mostra imagens dos resultados da simulação comparando fluxo de gás em duas concepções de difusores diferentes, sendo a proposição (a) com os furos de saída de gás direcionados contra a superfície interna do bocal, e a proposição (b) com os furos direcionados para a peça. Analisando esse resultado foi possível notar uma distribuição mais uniforme do modelo (a). Além disso, essa é a configuração dos furos direcionados contra a parede interna do bocal, a qual tradicionalmente é utilizada nas tochas de soldagem MIG, TIG, e no interior do *gás-lens* das tochas TIG.

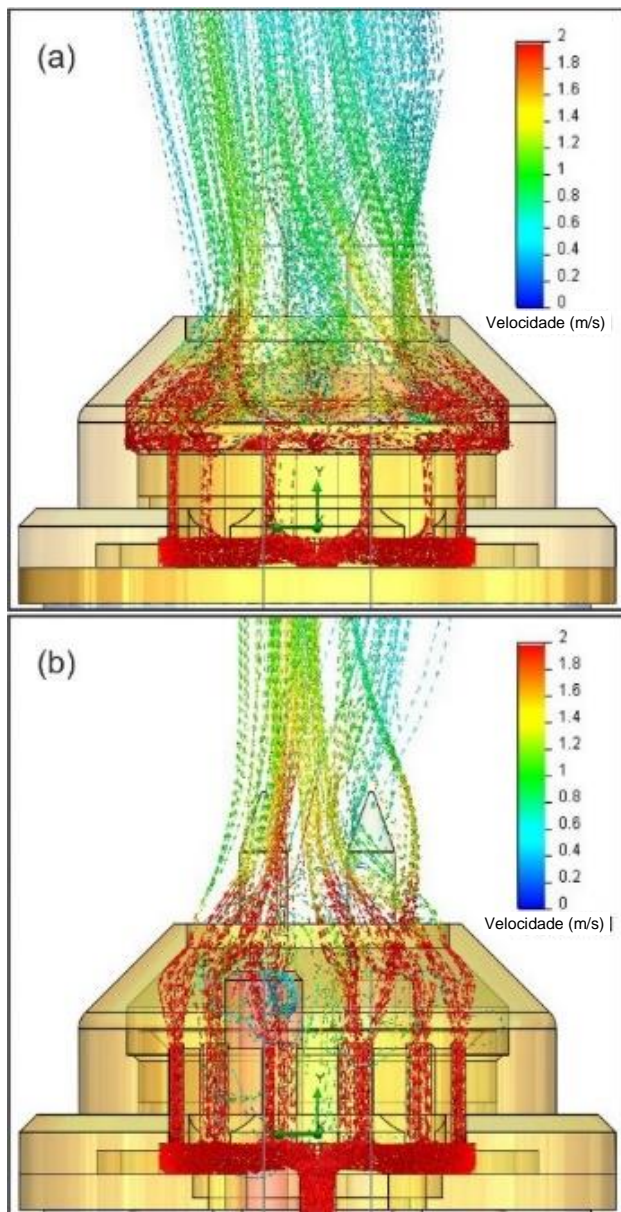


Figura 53 - Imagens da simulação numérica do fluxo de gás feita durante o projeto da tocha TIG-DE para comparar duas concepções diferentes do difusor de gás

A Figura 54 mostra imagens da tocha de soldagem após fabricação e montagem, e a Figura 55 mostra imagens da tocha nos primeiros testes de soldagem. A fabricação das peças e montagem da tocha foi realizada no ISF (*Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik* da universidade RWTH em Aachen). De maneira geral, a tocha de soldagem atendeu aos requisitos do projeto e possibilitou a configuração de variados posicionamentos entre os eletrodos, conforme era desejado para o estudo do processo. O uso de uma base refrigerada para o bocal metálico, também se mostrou eficiente, sendo que os bocais resistiram aos diversos testes sem problemas de aquecimento excessivo. Não houve problemas de aquecimento excessivo da tocha (exceto nas configurações onde o desvio do arco era intenso) e foi possível realizar testes com 450 A em cada eletrodo (corrente máxima da fonte em cada saída).

A escolha do eletrodo de 4,8 mm se mostrou adequada, pois não foi notado aquecimento excessivo durante os testes. Os ensaios mostrados nas seções anteriores haviam sido realizados com eletrodos ponta vermelha (EWTh-2), dopados com 2% de óxido de tório. Nos ensaios realizados com a segunda tocha TIG-DE desenvolvida foram utilizados eletrodos ponta rosa da marca Lymox®. De acordo com os fabricantes e revendedores na Alemanha, esse é um dos eletrodos mais modernos e que apresenta o melhor resultados em comparação com os demais (considerando os diferentes critérios como facilidade de abertura do arco, menor desgaste durante a utilização e boa estabilidade do arco). De maneira geral, os eletrodos dopados com óxido de tório não estão mais sendo comercializados na Alemanha.

Segundo informações divulgadas pelos fabricantes, esses eletrodos Lymox são dopados com óxidos mistos de terras raras, porém não é informado o percentual e a composição. Foi realizada uma tentativa de identificar quais eram os elementos presentes no eletrodo utilizando a microanálise de EDS (espectrometria por dispersão de energia de raios-x) em um MEV (microscópio eletrônico de varredura). Porém, devido às limitações inerentes a esse tipo de análise, não foi possível obter informações adicionais ao que já é divulgado pelo fabricante. Nas análises realizadas, os resultados mostraram picos identificados como Cério que equivalem a cerca de 2% em peso dentro do tungstênio, conforme os padrões do equipamento. Porém, de acordo com os operadores do MEV, esse resultado não garante que se tenha somente Ce, e que o percentual apontado tenha boa confiabilidade. É possível que tenham outros elementos próximos como La também que possui espectro de energia emitida praticamente idêntico ao Ce. Dessa forma, seria necessário análises por outras técnicas para poder identificar a composição desses eletrodos,

tarefa que não foi realizada no presente trabalho. Mesmo assim, considera-se que a análise foi útil de alguma forma, pois não foi possível identificar a presença de outros elementos que normalmente não são utilizados nos eletrodos de soldagem a arco.

A eficiência de distribuição do gás de proteção da tocha desenvolvida foi adequada para a realização dos ensaios sem problemas de oxidação excessiva da poça de fusão e eletrodos. Mas em comparação com a longa experiência de uso das tochas comerciais que utilizam bocais com sistema *gás-lens*, o desempenho da tocha foi considerado inferior, principalmente quando utilizado o primeiro bocal de proteção fabricado (o qual tinha somente 16 mm de comprimento). Com o aumento do comprimento dos bocais para 21 mm, a proteção melhorou bastante. Essa questão será discutida no Capítulo 7, onde são mostrados ensaios usando a técnica *Schlieren* que foram realizados com objetivo de avaliar o fluxo de gás com os diferentes bocais.



Figura 54 - Imagens da segunda versão de tocha TIG duplo eletrodo desenvolvida e fabricada em parceria entre o LABSOLDA-UFSC e o ISF-RWTH-Aachen

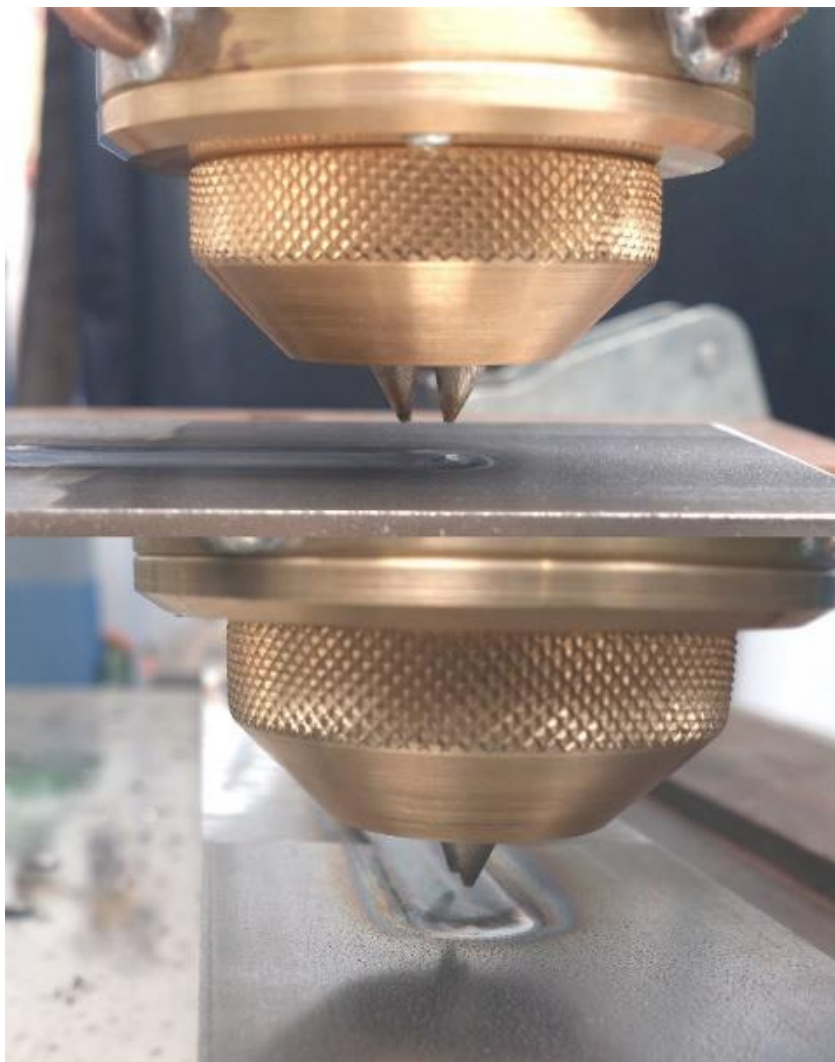


Figura 55 - Imagens da segunda versão de tocha TIG duplo eletrodo desenvolvida e fabricada em parceria entre o LABSOLDA-UFSC e o ISF-RWTH-Aachen

5.3.2. Bancada de ensaios ISF

Como já citado anteriormente, o presente trabalho foi realizado em parceria com o ISF (*Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik* da Universidade RWTH em Aachen). Além da construção da tocha, grande parte dos resultados apresentados na sequência do texto tem base nos ensaios realizados no ISF. No presente item estão apresentados os equipamentos que foram utilizados. A Figura 56 mostra os principais componentes da bancada de soldagem, indicando os seguintes itens numerados:

- 1- Fonte de soldagem IMC Digiplus A7 versão TIG-DE.
- 2- Mesa de soldagem com deslocamento motorizado (responsável pelos deslocamentos no “eixo x”).
- 3- Eixo de posicionamento manual da tocha com guias e fuso de esferas (responsável pelos deslocamentos no “eixo y”).
- 4- Eixo de posicionamento manual da tocha com guias e fuso de esferas (responsável pelos deslocamentos no “eixo z”).
- 5- Tocha de soldagem.
- 6- Gabinete de controle eletrônico da mesa de soldagem.
- 7- Computador utilizado para aquisição de dados (corrente e tensão), controle da movimentação da mesa de soldagem, e filmagem em alta velocidade.
- 8- Câmera de alta velocidade (Marca: Fotron, Modelo: FASTCAM SA4 500K-C1).
- 9- Bloco de cobre refrigerado à água (utilizado para refrigerar a chapa de cobre utilizada nos ensaios de soldagem sobre cobre e também como base para os outros ensaios com chapas de aço).
- 10 – Unidade de refrigeração de água para a tocha de soldagem.

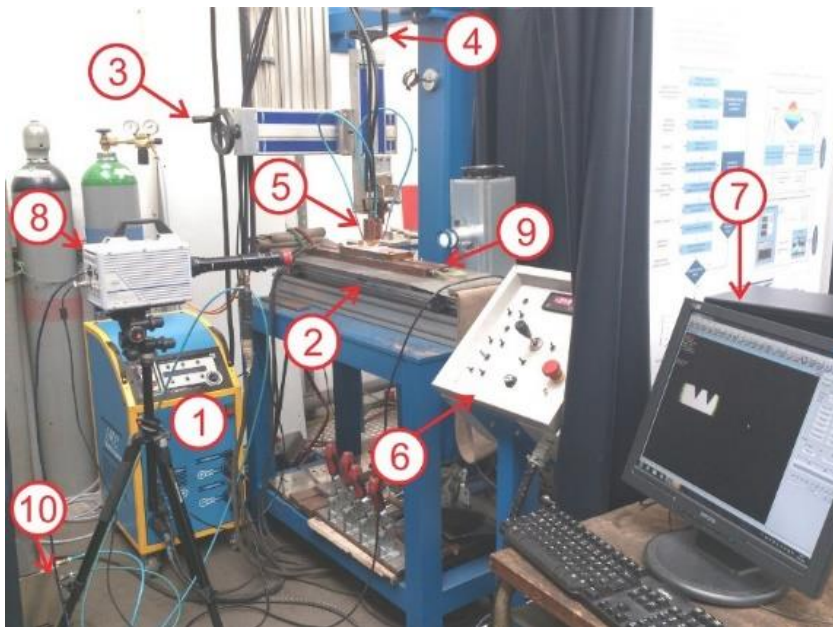


Figura 56 - Imagem da bancada de soldagem TIG duplo eletrodo no ISF-RWTH-Aachen

O sistema de aquisição de dados de soldagem (corrente e tensão) e sistema de controle de movimentação da mesa de soldagem foi realizado utilizando módulos de fabricação da empresa *National Instruments®* ligados a um PC. A Figura 57 mostra os módulos utilizados com as conexões que foram realizadas.

1- Módulo NI cDAQ-9178: Placa base que faz a interface entre os módulos (aquisição e comando) e o PC, utilizando uma interface USB.

2- Módulo NI 9205: Módulo de aquisição de dados com 24 entradas analógicas $\pm 10\text{ V}$ com resolução de 16 bits, e erro absoluto de $6,23\ \mu\text{V}$. Possui alta impedância de entrada, característica desejada para sistemas de aquisição de dados para diminuir a interferência do sistema de medição nos sinais medidos. Esse módulo foi utilizado na aquisição dos sinais de corrente e tensão.

3- Módulo NI 9263: Módulo com 4 saídas analógicas de $\pm 10\text{ V}$, com erro típico de 55 mV . Utilizado para comandar a velocidade de deslocamento da mesa de soldagem.

4- Módulo NI 9402: Módulo com 4 entradas ou saídas digitais, operando em nível TTL. Utilizado como entrada digital para receber o sinal de disparo para iniciar a movimentação após o arco ser aberto.

5- Filtro analógico RC passivo tipo passa-baixa para filtrar os sinais de tensão do arco.

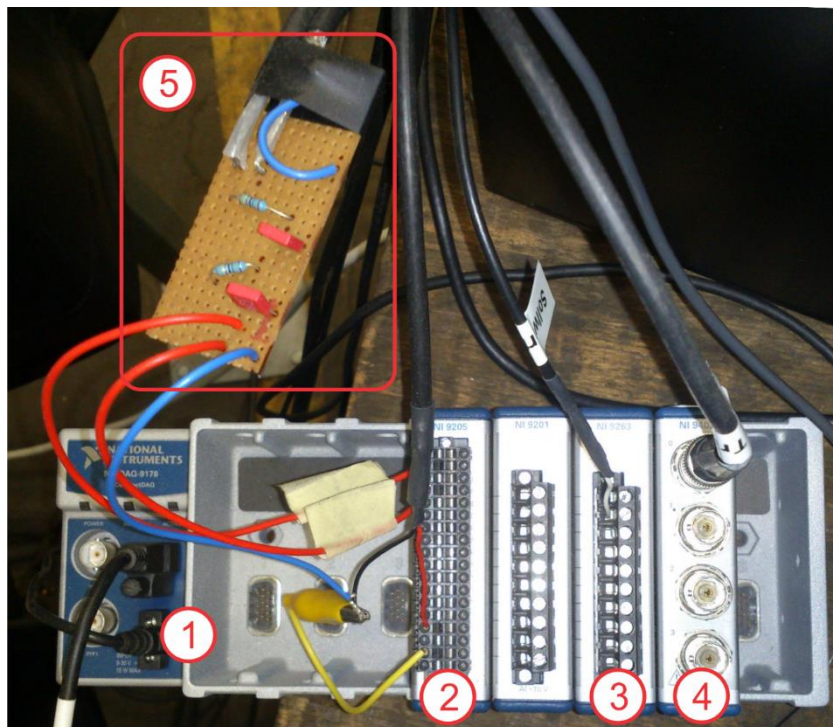


Figura 57 – Módulos de aquisição utilizados para fazer o sistema de aquisição de dados e comando da mesa de soldagem

A medição dos sinais de tensão do arco foi feita individualmente para cada eletrodo, conectando os terminais de aquisição direto em cada corpo de cobre da tocha, e o outro ponto de medição foi conectado na placa de cobre sobre a mesa de soldagem. Esses cabos para medição de tensão foram conectados em um amplificador com isolamento galvânico com ganho de 0,1 vezes. Esse amplificador servia como um fusível para proteger os módulos de aquisição (de um pulso da abertura por alta frequência, por exemplo), e também, já baixava os valores da tensão para a faixa de medição compatível com a entrada analógica do módulo de aquisição utilizado. Foi utilizado um filtro RC passa baixa (com um resistor de 2,2 k Ω e um capacitor de 22 nF) para tratar os sinais de tensão e facilitar a interpretação dos dados sem que fosse necessário aplicar um filtro digital posterior. A leitura de sinal de tensão de um processo a arco com fonte

chaveada naturalmente irá apresentar um aspecto de ruído no sinal. Mesmo conectando os fios de leitura de tensão diretamente na peça e no corpo da tocha (eliminando assim a indutância e a queda de tensão dos cabos), esses fios de leitura de tensão passam inevitavelmente perto dos cabos da tocha, e acabam captando ruídos de origem eletromagnética induzidos pelos cabos. O filtro que foi utilizado é semelhante ao usado no sistema de aquisição de dados SAP utilizado no LABSOLDA. A Figura 58 mostra a comparação dos sinais aquisitados com e sem o filtro, evidenciando a melhoria na facilidade de interpretação dos dados.

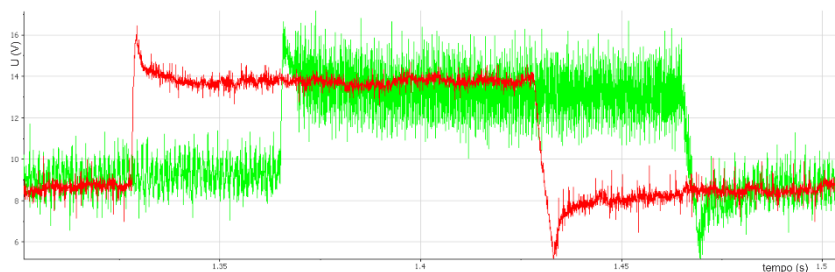


Figura 58 - Efeito do filtro analógico do sinal de tensão. Em verde o sinal original, e em vermelho o sinal filtrado

Para evitar que os equipamentos de aquisição fossem danificados durante a abertura do arco por pulsos de alta frequência, foi desenvolvida uma unidade eletrônica para conectar os sinais de tensão de cada eletrodo somente após a abertura do arco. Para isso foi utilizado um conjunto de relés e transistores. Como referência para fechar o contato dos relés (e completar o circuito de leitura de tensão) foi utilizado o sinal de “arco bom” disponibilizado pela fonte de soldagem. A Figura 59 mostra imagens da unidade de controle que estava ligada entre a tocha e o amplificador com isolamento galvânico.



Figura 59 - Módulo eletrônico construído para isolar os sinais de tensão durante os pulsos de alta frequência da abertura do arco

O programa feito em *LabVIEW*® que é utilizado no ISF em conjunto com os módulos da *National Instruments* foi adaptado para comandar a velocidade da mesa de soldagem, permitindo criar rotinas personalizadas de velocidade que foram necessárias durante os testes, como por exemplo: executar 3 diferentes velocidades no mesmo cordão de solda, e também realizar movimentação por um tempo determinado alternando de direção automaticamente. As aquisições foram realizadas com frequência de 20 kHz. A Figura 60 mostra a tela do programa listando as suas partes principais:

- 1- Janela de configurações da velocidade da mesa de soldagem.
- 2- Janela que exhibe o gráfico da velocidade de soldagem executado.
- 3- Janela que exhibe o gráfico dos sinais de tensão.
- 4- Janela que exhibe o gráfico dos sinais de corrente.

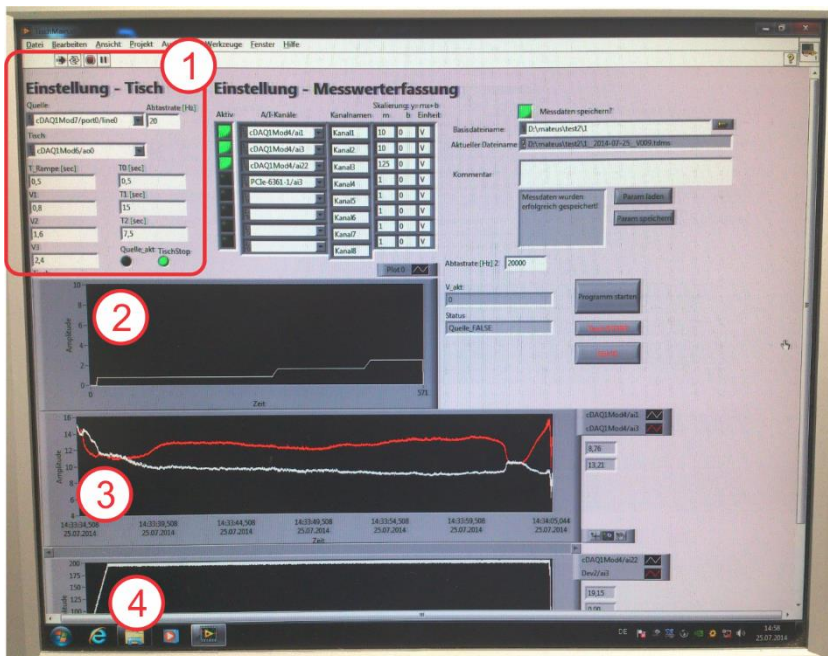


Figura 60 - Tela do programa feito em LabVIEW utilizado para aquisição dos sinais de corrente e tensão, e controle da velocidade de soldagem

5.3.3. Geometria de afiação dos eletrodos

Já é bastante difundido em qualquer material de ensino de processos de soldagem a informação que a afiação do eletrodo de tungstênio influencia de alguma forma o processo TIG. Se para a soldagem manual de uma forma geral, o ângulo de afiação é mais uma questão de gosto pessoal do soldador, em aplicações de alta produtividade e que utilizam correntes elevadas, a afiação do eletrodo é um parâmetro fundamental que afeta de maneira decisiva o resultado da soldagem. Para o processo TIG-DE é possível afirmar que a afiação do eletrodo é ainda mais importante do que o processo convencional, pois além de todos os fatores que já influenciam o processo de eletrodo único, no duplo eletrodo essa questão determina também a possibilidade de posicionamento entre os eletrodos, que é um dos principais parâmetros do processo. Considerando que no TIG-DE a situação operacional com o menor afastamento possível dos eletrodos é uma das mais interessantes, a própria afiação do eletrodo tem grande influência no menor afastamento possível de ser obtido.

A Figura 61 ilustra essa importância. Na primeira coluna da figura estão mostrados os eletrodos com 3 afiações diferentes (30, 45 e 60°), que foram posicionados de modo que o afastamento entre a superfície do cone de cada eletrodo fosse 1 mm. Os eletrodos foram posicionados usando 20° de inclinação relativa um ao outro (maior ângulo que a tocha possibilita). É possível notar que usando diferentes afiações, a distância entre a ponta dos eletrodos varia, mas nos ângulos de afiação mostrados não permite que seja utilizado afastamentos realmente pequenos (como 1 mm por exemplo). Quanto maior o ângulo de afiação, maior fica a distância mínima entre a ponta dos eletrodos.

A segunda coluna desta figura mostra o aspecto do arco usando 200 A em cada eletrodo para as diferentes situações. É possível verificar que para as três configurações ocorre desvio do plasma em direção contrária à peça. No caso dos eletrodos com 60°, uma maior porção do plasma desviado em direção contrária à peça está em contato com a superfície do eletrodo, o que tenderia a causar maior aquecimento dos eletrodos em comparação com as outras situações.

Para que fosse possível utilizar pequenas distâncias entre a ponta dos eletrodos (de forma que o desvio do arco resultante pudesse ser diminuído), seria necessário diminuir o ângulo de afiação da ponta dos eletrodos, ou aumentar o ângulo de inclinação entre os dois eletrodos na tocha. Essa segunda alternativa não era possível, já que 20° é o maior ângulo possível na tocha fabricada, e também, porque quanto maior for esse o ângulo, maior tende a ser o próprio diâmetro da tocha (o que naturalmente não é desejado). A terceira coluna mostra o aspecto do arco utilizando a técnica do pulsado sincronizado fora de fase, com I_p : 370 A, I_b : 30 A, e tempo de pulso e base de 0,1 s. É possível visualizar (da mesma forma como já mostrado na Figura 46) que o desvio do arco é muito menor utilizando essa técnica do que usando corrente constante nos dois eletrodos.

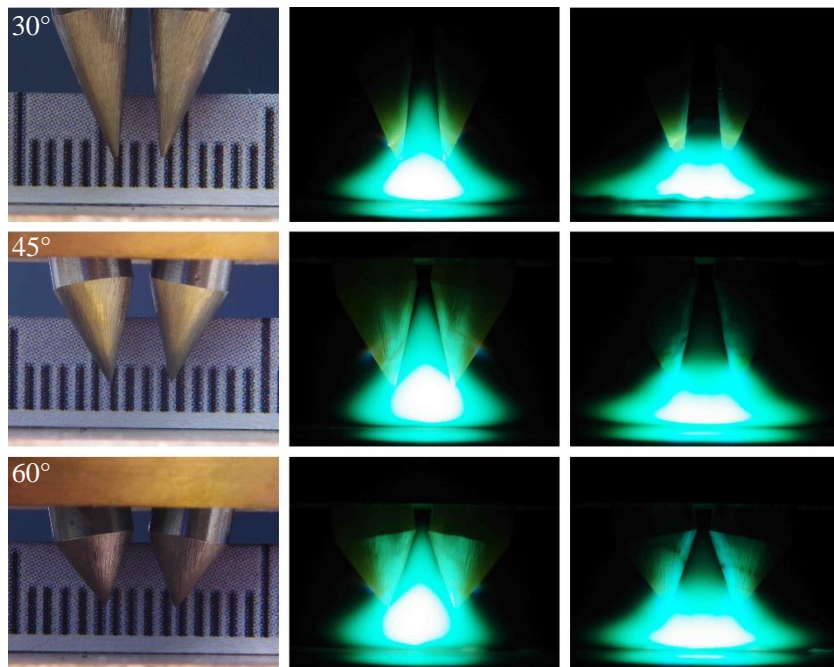


Figura 61 - Imagens do arco com diferentes ângulos de afiação dos eletrodos.
 (Vs: 0,4 m/min. DEP: 3 mm. Imagens da coluna central: 200 A em cada eletrodo. Imagens da coluna à direita: pulsado sincronizado fora de fase com I_p : 370 A, I_b : 30 A, t_p e t_b : 0,1s. Tempo de exposição da imagem: 0,2 s)

Como única alternativa para aproximar a ponta dos eletrodos, a afiação dos eletrodos passou a ser feita em 20° . Dessa forma, usando também na tocha a inclinação de 20° entre os eletrodos, a superfície afiada da ponta dos dois eletrodos ficam paralelas e é possível posicionar a ponta dos eletrodos com qualquer afastamento desejado. A Figura 62 mostra os eletrodos afiados com ponta em 20° posicionados com afastamento de 1 mm. Nesse caso, os eletrodos foram afiados com ponta em tronco de cone com diâmetro aproximado de 2 mm. É possível verificar que o desvio do arco na região entre os eletrodos é praticamente inexistente mesmo usando corrente constante nos dois eletrodos como mostrado nos quadros (a) e (c), possibilitando a operação do processo sem superaquecer os eletrodos e a tocha de soldagem (inclusive com corrente de 350 A em cada eletrodo, condição mostrada no quadro (c)). Considerando esses fatores, o ângulo de afiação em 20° foi o escolhido para realizar a sequência de ensaios no restante do trabalho.

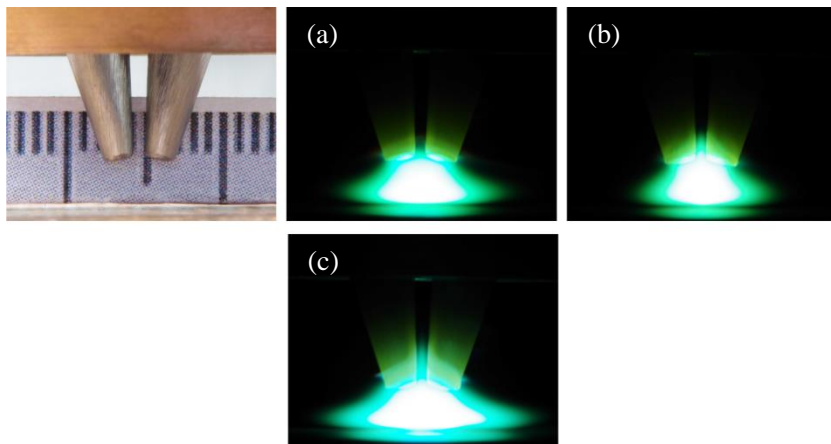


Figura 62 - Aspecto do arco utilizando eletrodo afiado com ângulo de 20° no processo TIG duplo eletrodo. (V_s : 0,4 m/min. DEP: 3 mm. (a): 200 A (corrente constante) em cada eletrodo. (b): Pulsado sincronizado fora de fase com I_p : 370 A, I_b : 30 A e $t_p=t_b$: 0,1s. (c): 350 A (corrente constante) em cada eletrodo. Tempo de exposição das imagens: 0,2 s)

5.3.4. Medição de pressão do arco para o processo TIG-DE

Descrição dos ensaios

Conforme já foi citado na revisão das publicações apresentadas no Capítulo 4, a principal vantagem do processo TIG Duplo Eletrodo é a menor pressão do arco, em comparação com o processo convencional, para a mesma corrente total. Nos resultados mostrados nas seções anteriores, a distância entre os eletrodos tem aparecido como fator fundamental alterando significativamente a morfologia do arco. Por conta disso decidiu-se realizar medições da pressão do arco com diferentes distâncias entre os eletrodos. Os trabalhos de Leng et al. [21-22, 27] mostram medições de pressão do arco avaliando a influência do afastamento dos eletrodos, porém não são testadas condições de afastamentos realmente pequenos (como 1 mm por exemplo). Além disso, as avaliações encontradas não contextualizam de maneira detalhada, ou apresentam as condições reais do arco, como por exemplo, a situação do desvio do arco em cada configuração operacional exibida.

A medição da pressão de estagnação foi realizada pelo método denominado “small hole” utilizando um aparato constituído por um bloco de cobre refrigerado por água. O orifício de medição utilizado possui 0,5 mm de diâmetro, sendo que o furo foi feito em um cilindro de tungstênio que estava inserido por pressão na região central do bloco de cobre. O uso do tungstênio tinha objetivo de prolongar a vida útil do

orifício de medição, evitando que o mesmo fosse facilmente fundido ou tivesse sua geometria afetada durante os ensaios. No lado inferior da chapa, de maneira concêntrica ao orifício de medição, foi parafusado um sensor de pressão com faixa de medição de 0-100 mBar (modelo DMP 343 fabricado pela empresa DB Sensors GmbH). Segundo o fabricante, o sensor apresenta excelente linearidade e pequena deriva térmica, apresentando erro máximo de $\pm 0,5\%$ do valor final de escala (considerando os valores máximos dos erros de linearidade, histerese e repetitividade), e erro máximo de deriva térmica do valor de zero de $\pm 1,5\%$ do valor final de escala no intervalo de 0-50°C.

A Figura 63 mostra um desenho esquemático indicando os componentes do aparato de medição da pressão do arco, e a Figura 64 mostra fotografias do bloco de cobre utilizado.

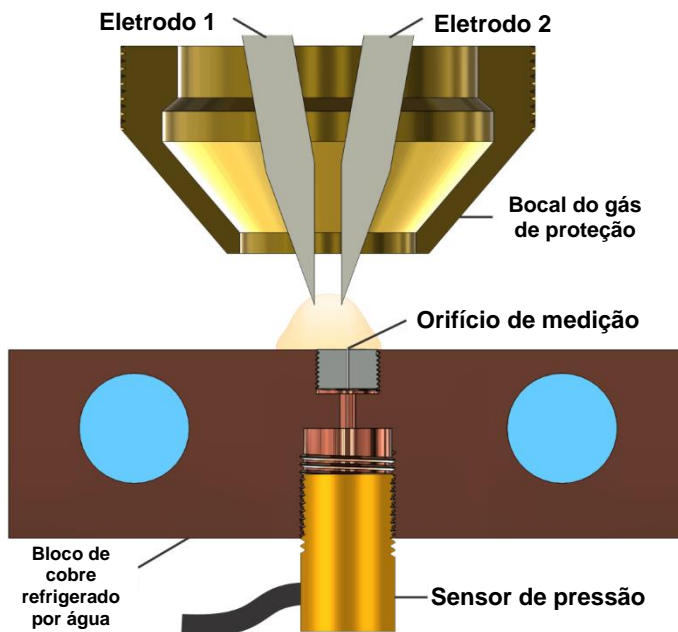


Figura 63 - Desenho esquemático mostrando o aparato experimental utilizado para medição da pressão de estagnação do arco



Figura 64 - Aparato de medição de pressão do arco. (a): Tocha duplo eletrodo posicionada sobre o aparato de medição. (b): Imagem mostrando a tocha sem o bocal de gás de proteção permitindo visualizar os eletrodos e o orifício de medição

Todas as medições foram realizadas com os eletrodos afiados com a ponta em 20° , e posicionados entre si com inclinação relativa de 20° na tocha. Foram realizados ensaios com 4 diferentes distâncias entre a ponta dos eletrodos: 0,5 mm, 2 mm, 4 mm e 6 mm. Utilizou-se 3 mm de distância

entre os eletrodos e a superfície do bloco de cobre, e antes de cada ensaio o eletrodo era afiado novamente (buscando eliminar a influência de usar eletrodo com afiação usada ou nova). A corrente foi de 70 A em cada eletrodo (corrente constante). Um dos focos do presente trabalho é o estudo do processo TIG-DE em situações de elevada corrente, então o mais adequado seria realizar os ensaios de medição de pressão de estagnação também com correntes elevadas. Porém, para garantir que não existiria o risco do aparato ser danificado, o valor máximo de corrente utilizado em cada eletrodo teve que ser limitado à 70 A.

Para servir de base de comparação com os resultados do TIG-DE, também foram realizados ensaios com eletrodo único usando corrente de 70 A e de 140 A, nas mesmas condições dos ensaios com duplo eletrodo.

Para aquisição das medições e alimentação do sensor foi utilizado um registrador de dados (modelo CIT 650 da Empresa BD Sensors GmbH) configurado para registrar uma medição da pressão a cada segundo, sendo que esse valor registrado a cada segundo era formado por uma média de 8 medições realizadas durante esse período (1 s). A Figura 65 mostra imagens do sensor de pressão e do registrador de dados utilizados.

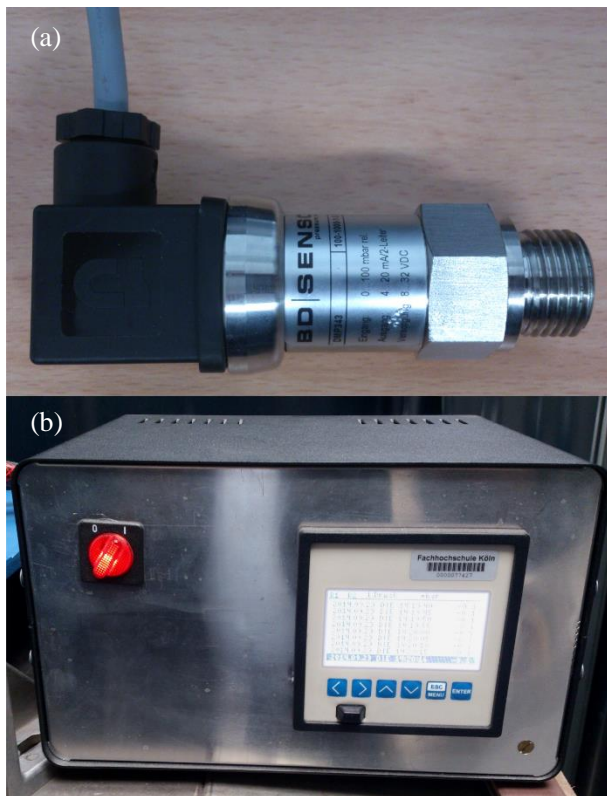


Figura 65 - Equipamentos utilizados para as medições de pressão de estagnação. (a): Sensor de pressão utilizado. (b): Registrador de dados

A movimentação relativa entre o bloco de cobre e a tocha de soldagem foi realizada cobrindo uma área de 40 mm x 5 mm com o orifício de medição posicionado no centro dessa área, conforme ilustrado na Figura 66. Essa movimentação da tocha de soldagem em uma área em torno do orifício de medição foi realizada para que fosse possível ter uma medição bidimensional da pressão em toda a extensão do arco. O deslocamento no eixo x foi executado pela mesa de soldagem motorizada com movimentação programada via computador, que permitiu criar a rotina de movimentação desejada (deslocar a mesa com velocidade constante e inverter a direção de movimentação depois de um tempo determinado por repetidas vezes). A velocidade de deslocamento no eixo x foi de 0,5 mm/s, resultando em um valor de medição de pressão a cada meio milímetro de deslocamento. O deslocamento no eixo y foi realizado por meio de um posicionador com mecanismo de fuso de esferas, que mesmo para um

deslocamento manual apresentava resolução de aproximadamente 0,01 mm, permitindo modificar a posição da tocha adequadamente a cada inversão de movimento. Todos os ensaios foram realizados com a tocha iniciando na posição -2,5 mm no eixo y, e a cada inversão do sentido de movimento em x a tocha era deslocada 0,5 mm em direção crescente do eixo y, finalizando na posição + 2,5 mm no eixo y. Isso resultou em 11 linhas de dados adquiridos cobrindo a área de medição com resolução equivalente a um ponto de medição a cada 0,5 mm. Para apresentação dos resultados em gráficos de duas dimensões, as 11 linhas de dados obtidas em cada diferente posição de y foram organizadas de maneira a reproduzir a posição real nos eixos xy, e os gráficos em duas dimensões foram plotados.

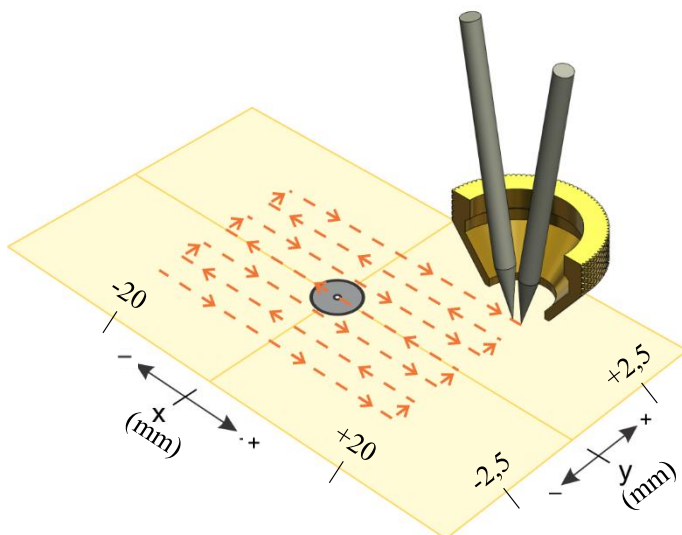


Figura 66 - Figura esquemática mostrando a movimentação da tocha de soldagem em torno do orifício de medição durante os ensaios de medição da pressão de estagnação do arco



Figura 67 - Procedimento de aferição utilizando relógio comparador para verificar se os sistemas utilizados para movimentação estavam adequados

A Figura 67 mostra uma imagem dos testes usando um relógio comparador, que foram executados para verificar se a movimentação dos posicionadores utilizados e da própria mesa de soldagem estava adequada. Durante os testes de aferição do sistema de deslocamento da mesa de soldagem foi verificado que o controle via software estava comandando adequadamente o tempo e a mesa estava se deslocando com velocidade adequada em cada direção. Porém, foi notado que no momento da inversão de sentido ocorria um pequeno erro de histerese (atribuído à folga do conjunto mecânico). Esse erro resultava em pequenos deslocamentos para um dos lados, que após as 10 inversões consecutivas realizadas no ensaio, causava uma diferença de posicionamento de aproximadamente 1 mm entre a posição inicial e final do eixo x. Dessa forma, para que os gráficos plotados não fossem mostrados de maneira distorcida devido ao fato do sistema utilizado não garantir perfeitamente o sincronismo entre a posição esperada para os dados aquisitados, adotou-se o procedimento de corrigir a centralização de algumas das linhas de dados. As correções realizadas, quando necessárias, foram de no máximo 0,5 mm em relação à posição da distribuição de pontos obtidas originalmente no experimento. O procedimento utilizado nessa correção, foi o de centralizar a distribuição dos pontos de cada linha procurando obter uma distribuição simétrica em relação ao centro. Esse procedimento foi possível também porque a área de medição utilizada era muito maior do que o necessário (cada linha de dados tinha 40 mm, mas as medições tiveram valores diferentes de zero somente numa faixa central dessa linha, a qual apresentou no máximo cerca de 15 mm).

Com relação aos erros do sensor de pressão utilizado, durante os testes foi notado um pequeno erro no valor de zero ($\pm 0,1$ mBar), o qual foi

atribuído à uma possível deriva térmica. Esse erro fazia com que normalmente no começo das medições o valor de “zero” indicado fosse -0,1 mBar, e conforme o ensaio estava sendo realizado o valor de zero passava para 0, e até para 0,1 mBar. De qualquer forma, esse erro apresentado estava muito abaixo dos erros máximos especificados pelo fabricante ($\pm 0,5$ mBar), e foi pouco significativo em relação aos valores absolutos medidos. Analisando os resultados obtidos, foi possível afirmar que o ensaio apresentou boa repetitividade. Essa conclusão foi sustentada também pela análise dos dados das 3 medições diferentes realizadas com a mesma condição (usando apenas 1 eletrodo com 140 A). As medições foram realizadas em dias diferentes, e também com eletrodos novamente afiados. Como mostrado na Figura 68, é possível notar os valores obtidos nas diferentes medições realizadas foram bastante próximos.

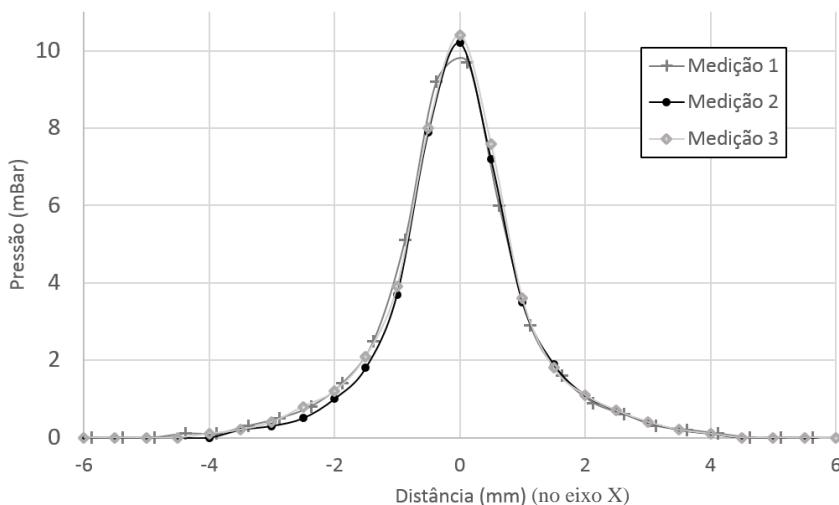


Figura 68 - Gráfico mostrando o resultado das 3 medições diferentes realizadas para a mesma condição experimental

Resultados e discussões

A Figura 69 mostra a distribuição de pressão que foi obtida com as diferentes distâncias entre os eletrodos. Os gráficos foram plotados de maneira justaposta para ilustrar a diferença de magnitude entre os valores de cada condição testada, e cada gráfico é composto somente pelos valores obtidos no intervalo ± 7 mm no eixo x, pois foi nesse intervalo que os valores de pressão medidos foram diferentes de zero. As medições mostram que o aumento da distância entre os eletrodos de 0,5 mm até 6 mm causa forte diminuição dos valores máximos obtidos, e também modifica a morfologia da distribuição, passando de um pico único nas menores distâncias, para uma distribuição com dois picos na condição de maior afastamento entre os eletrodos.

A Figura 70 mostra os dados plotados em gráficos de superfície em vista superior. Para plotar esses gráficos foi utilizado o Software Matlab® e os pontos originais da medição foram interpolados com um *mesh* de 100 divisões entre cada eixo. É possível observar a mudança na distribuição da pressão de acordo com os diferentes afastamentos entre os eletrodos. Para 0,5 mm o perfil de distribuição foi maior no eixo y do que no eixo x. Para 2 mm a distribuição foi praticamente igual nos eixos x e y. Para 4 mm foi possível verificar forte aumento das dimensões no eixo x em comparação com o y. Na condição 6 mm a região do arco que apresenta maiores pressões possui dimensões com aproximadamente o dobro no eixo x em comparação com o eixo y, e também foi possível constatar a existência de dois picos de pressão bem definidos, evidenciando o desacoplamento dos arcos.

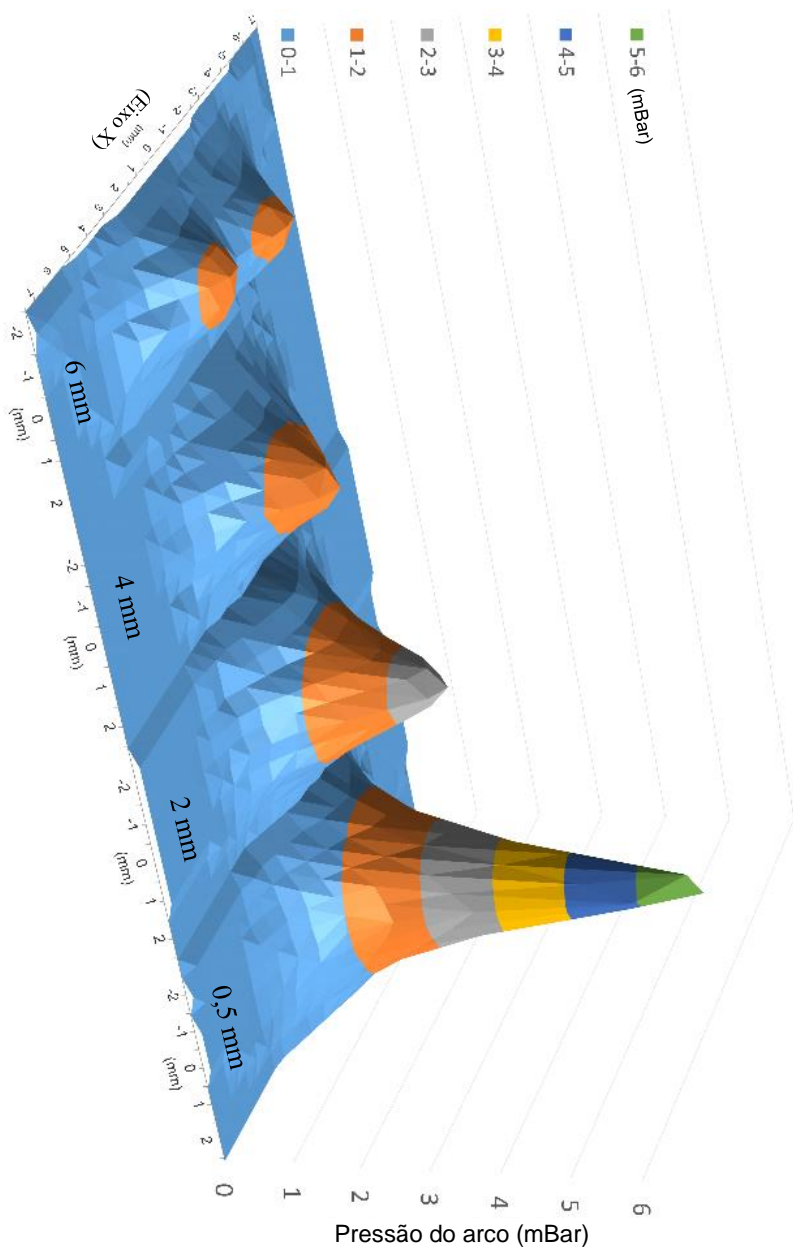


Figura 69 – Gráficos de pressão de estagnação do arco para o processo TIG duplo eletrodo utilizando diferentes afastamentos entre os eletrodos

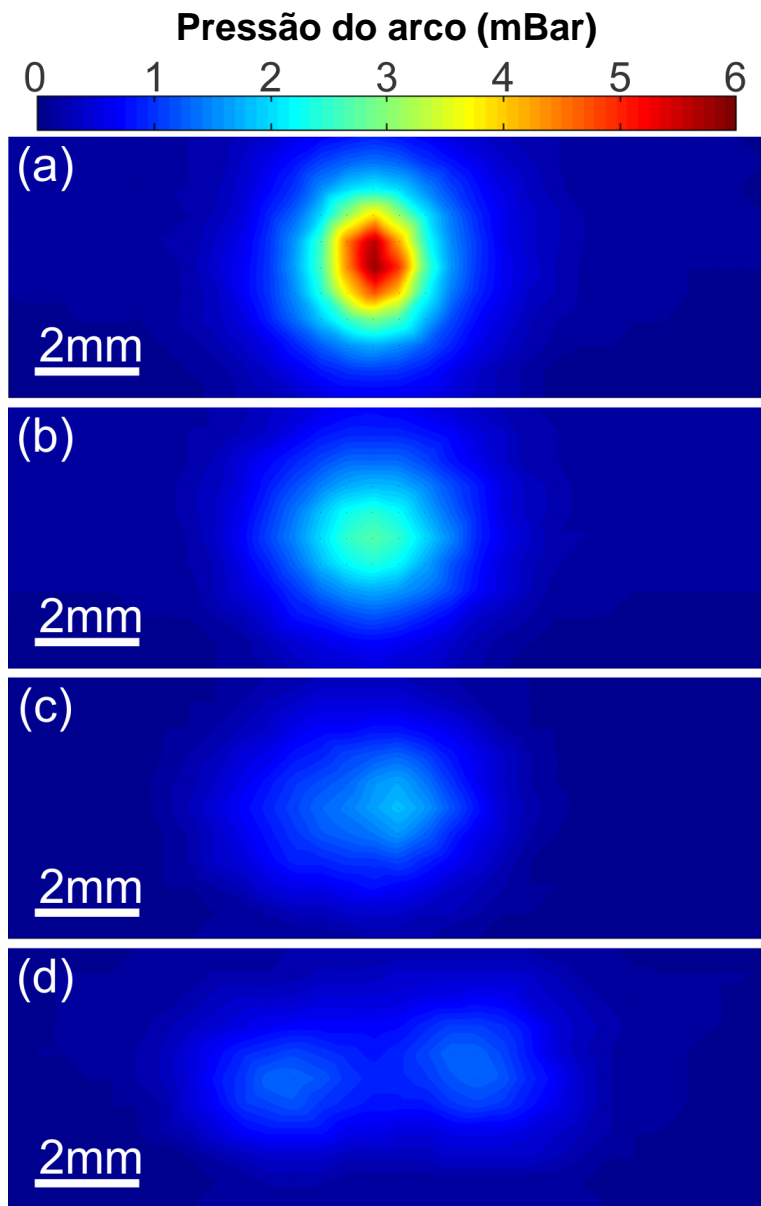


Figura 70 - Vista superior da distribuição de pressão com diferentes afastamentos entre os eletrodos. (a) 0,5 mm; (b) 2 mm; (c) 4 mm e (d) 6 mm

As linhas centrais de cada ensaio realizado, ou seja, a linha de deslocamento na qual o eletrodo estava posicionado no eixo y e sobre o orifício de medição foram plotadas e estão mostradas na Figura 71. É possível notar que para as distâncias de 0,5 mm e 2 mm a distribuição é semelhante a gaussiana, enquanto para a distância de 6 mm já aparecem dois picos bem definidos. Além disso, para todos os casos, os maiores valores de pressão estão sempre em posições entre os dois eletrodos conforme era esperado, já que a tendência é de atração entre condutores com mesma polaridade.

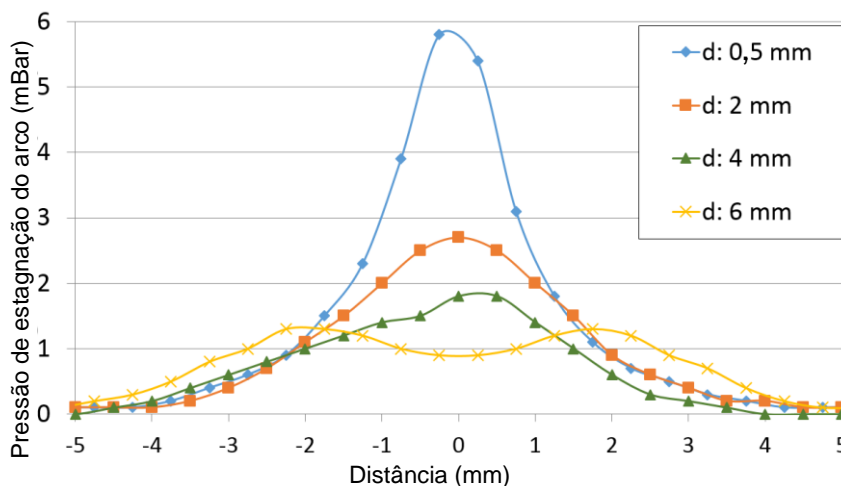


Figura 71 - Resultados da medição de pressão de estagnação para o processo TIG-DE utilizando diferentes distâncias entre os eletrodos

A Figura 72 mostra os resultados das medições com o processo duplo eletrodo em comparação com medições de pressão do processo realizadas com o processo TIG tradicional (eletrodo único). Primeiramente, analisando de maneira isolada os resultados da medição com eletrodo único, é possível verificar que a diferença dos valores para as correntes de 70 A e 140 A é de mais de 3 vezes, apesar do valor de corrente ter dobrado. Os resultados de Lin e Eagar [10] para o TIG convencional indicam que o valor máximo da pressão do arco aumenta linearmente com o aumento da corrente de soldagem, porém nesse trabalho a faixa de correntes estudada foi de 300-600 A. Trabalhos mais recentes como as medições apresentadas em [22] e os resultado de simulação numérica apresentada em [26] mostram que o valor máximo da pressão aumenta em mais de 4 vezes quando a corrente é aumentada de 100 A para 200 A no

processo convencional. As medições mostradas no trabalho [20] com o processo de eletrodo único corroboram todos esses resultados uma vez que o aumento da pressão máxima medida em um dos casos foi maior do que 5 vezes quando a corrente passou de 100 A para 200 A, por outro lado, para a faixa de 200-400 A o aumento da pressão máxima seguiu uma tendência próxima ao linear. Apesar das divergências (e da própria escassez de dados disponíveis) quando se analisa todos esses resultados de medição de pressão de estagnação ainda para o processo TIG convencional (eletrodo único), é possível afirmar que existe um consenso nos resultados dos diferentes trabalhos, indicando que a pressão de estagnação aumenta de forma muito mais acentuada do que a linear quando se aumenta a corrente de soldagem para valores abaixo do patamar de 200 A.

Os resultados mostram que a pressão do arco para o processo duplo eletrodo é muito menor em comparação com o processo com eletrodo único, se o critério de comparação for a corrente total utilizada no processo. Somente para o caso do afastamento de 0,5 mm entre os eletrodos (que seria o menor afastamento possível de utilizar na prática), a pressão foi maior do que no caso de eletrodo único com 70 A (aproximadamente o dobro deste valor), mas mesmo assim, o valor máximo resultante foi aproximadamente metade em comparação com o eletrodo único usando 140 A.

As observações feitas ao longo dos parágrafos anteriores sobre a pressão do arco do TIG convencional (eletrodo único), permite por si só justificar os menores valores de pressão de estagnação obtidos com o processo TIG-DE em comparação com o processo TIG convencional (considerando a mesma intensidade de corrente total). Uma vez que a corrente total pode ser dividida em dois eletrodos, cada eletrodo utiliza valores de corrente muito menores (em teoria metade da corrente que usada no processo de eletrodo único). Como a pressão do arco aumenta de forma não linear com o aumento da corrente, mesmo que o valor máximo da pressão de estagnação de cada eletrodo fosse integralmente somado, a soma desses valores tende a ser consideravelmente menor do que a pressão de estagnação do processo com eletrodo único usando o dobro dessa corrente.

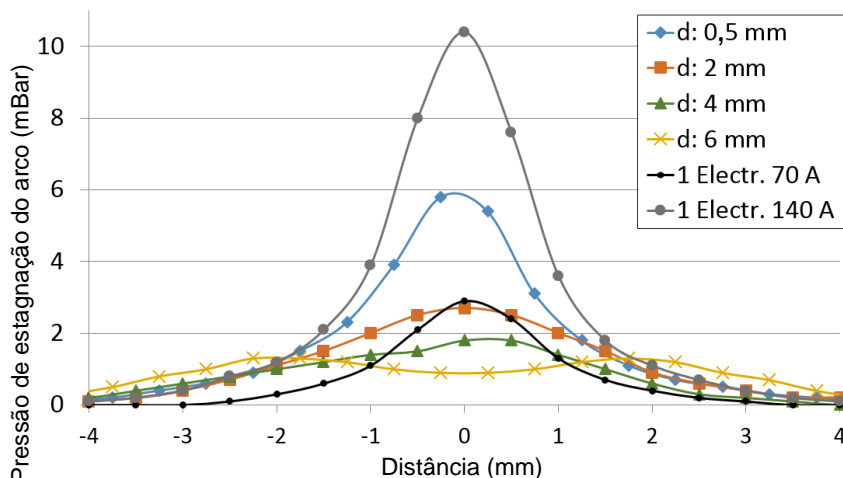


Figura 72 - Resultados da medição de pressão de estagnação para o processo TIG-DE utilizando diferentes distâncias entre os eletrodos em comparação com o processo TIG convencional

A Tabela 1 mostra os maiores valores de pressão medidos durante os ensaios em cada situação, e também a equivalência em relação à condição de 140 A usando eletrodo simples. Como já foi citado na seção 3.3, os autores de [13] mostram resultados indicando que a modificação do diâmetro do orifício de medição modifica significativamente os valores do experimento, e é de se esperar resultados diferentes devido às outras características construtivas dos aparatos diferentes, dificultando uma comparação direta entre os valores absolutos encontrados em diferentes publicações. Por isso, a comparação dos valores do duplo eletrodo expressos em percentual do valor medido com o processo TIG tradicional parece ser a forma mais adequada para possibilitar uma comparação entre os diferentes trabalhos. Os valores obtidos no trabalho de Leng et al. [23] mostram que essa razão variou de 0,18-0,32 para as diferentes condições testadas. Analisando os dados de Kobayashi et al. [20] a variação foi muito maior, com valores entre 0,2-0,7 comparando as diferentes condições testadas. No atual estudo essa variação ficou na faixa entre 0,13-0,56.

Tabela 1 – Valores máximos da pressão de estagnação do arco para cada condição e suas proporções com relação ao valor do processo convencional

	Valor máximo de pressão medido (mBar)	Proporção em relação ao TIG com eletrodo único usando 140 A
1 Eletrodo 140 A	10,4	1
1 Eletrodo 70 A	2,9	0,28
2 Eletrodos 70 A cada, d: 0,5 mm	5,8	0,56
2 Eletrodos 70 A cada, d: 2 mm	2,7	0,26
2 Eletrodos 70 A cada, d: 4 mm	1,8	0,17
2 Eletrodos 70 A cada, d: 6 mm	1,3	0,13

Essa faixa de variação relativamente grande pode ser explicada pela própria análise da morfologia do arco em cada condição, exibida nas imagens mostradas na Figura 73. É possível evidenciar que para as distâncias de 4 e 6 mm ocorre um significativo desvio do plasma em direção contrária à peça, o qual pode ser considerado como fator preponderante para os pequenos valores de pressão de estagnação do arco obtidos. Deve-se chamar atenção que apesar dos valores de pressão do arco serem baixos nessas condições, existem diferentes fatores já citados na seção 5.2 que impedem (ou tornam menos atrativa) a utilização em aplicações práticas do processo duplo eletrodo nesse tipo de situação de maior afastamento dos eletrodos. Além disso, o simples fato de uma significativa porção do arco estar desviado em direção contrária à peça já serve como indicação de que o arco não cumpre o papel de fundir a peça, fazendo com que o arco deixe de realizar sua função. Para as distâncias de 0,5 e 2 mm não é possível notar significativo desvio de parte do arco em direção contrária à peça, e o arco formado apresenta morfologia que indica também maior rigidez.

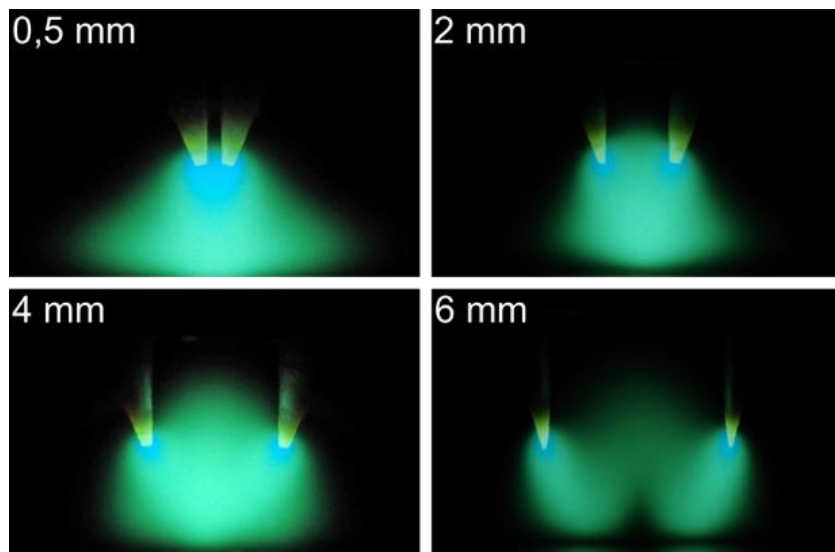


Figura 73 - Morfologia do arco para o processo TIG duplo eletrodo com diferentes afastamentos entre os eletrodos

5.3.5. Medições de pressão do arco para o TIG convencional

Aproveitando a disponibilidade do aparato de medição de pressão do arco, foram também realizadas medições para o processo TIG convencional, para verificar aspectos interessantes à soldagem de elevada produtividade, mas que não são encontrados dados ou resultados de medições na literatura. Nesse caso, foram abordadas duas questões específicas: A afiação do eletrodo em tronco de cone (truncado), e a utilização de misturas com percentuais de hidrogênio no argônio.

Afiação em tronco de cone

Como já foi descrito na seção 3.2, a afiação em tronco de cone contribui para diminuir a pressão do arco e possibilita diminuir a formação de *humping* e obter maiores velocidades de soldagem. Essa afirmação já havia sido comprovada na prática em [1] usando o processo TIG com elevadas correntes e elevadas velocidades, porém não são encontrados dados experimentais de medições desse tipo. Por conta disso, foram realizadas medições comparando a pressão de estagnação do eletrodo com afiação normal (pontiado), e com tronco de cone com 1 e 2 mm de diâmetro na ponta. A Figura 74 mostra os eletrodos que foram utilizados.

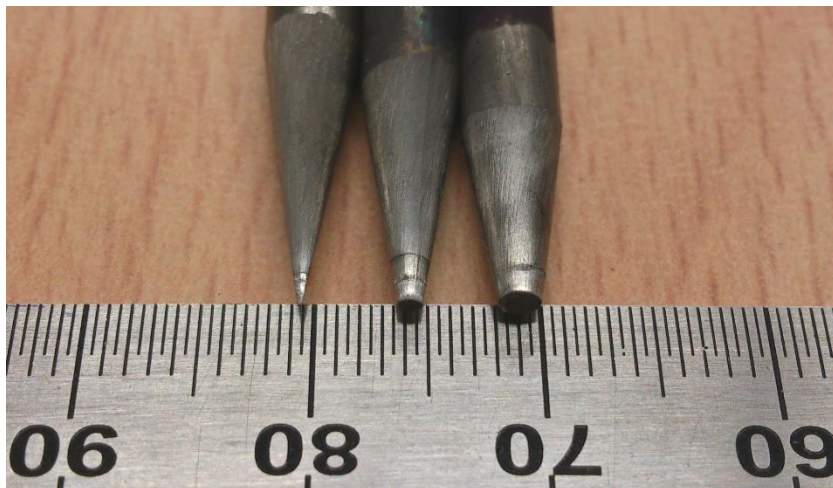


Figura 74 - Eletrodos utilizados para medição da pressão de estagnação do arco para comparar o efeito da afiação em tronco de cone

A Figura 75 mostra os gráficos da distribuição de pressão para cada eletrodo, que foram plotados de maneira justaposta usando a mesma escala para que pudesse ser visualizada a diferença dos valores. A Figura 76 mostra também a linha central de cada uma dessas medições (onde o eletrodo estava alinhado sobre o orifício de medição). É possível verificar a grande diferença nos valores de pressão, sendo que os valores máximos obtidos para o eletrodo “pontiado” foram cerca de duas vezes maior do que o eletrodo truncado com diâmetro 1 mm, e cerca de cinco vezes maior do que a maior pressão com o tronco de cone de 2 mm de diâmetro. Esses resultados ilustram muito bem a importância da afiação do eletrodo.

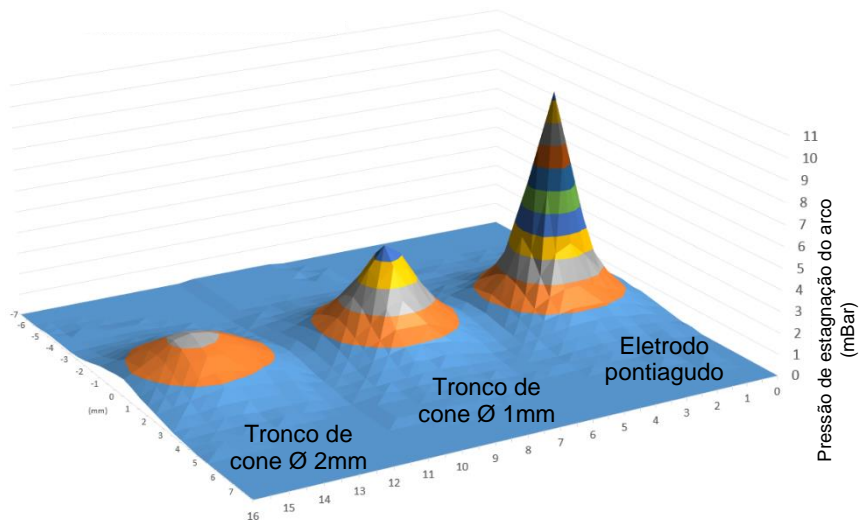


Figura 75 - Gráficos mostrando os resultados das medições de distribuição da pressão de estagnação do arco utilizando eletrodos com afiação normal (eletrodo pontiagudo), e afiação com tronco de cone com diâmetros 1 e 2 mm

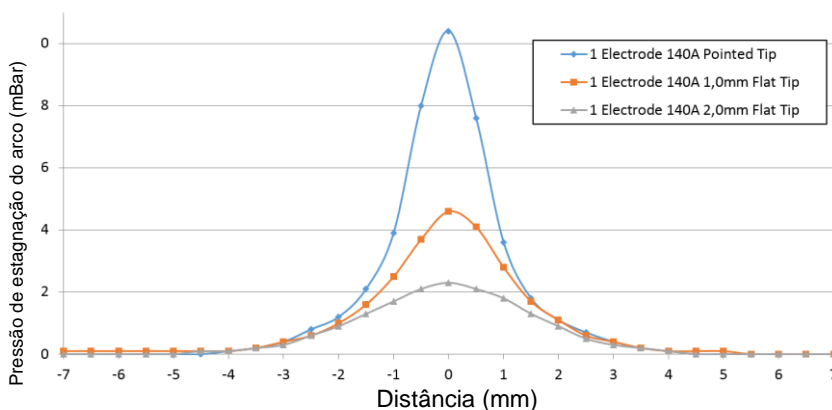


Figura 76 - Gráficos mostrando os resultados das medições da pressão de estagnação do arco utilizando eletrodos com afiação normal (eletrodo pontiagudo), e afiação com tronco de cone com diâmetros 1 e 2 mm (DEP 3 mm; gás Ar)

Medição da pressão do arco para mistura Ar-H₂

A adição de percentuais de H₂ ao argônio proporciona aumento da quantidade de metal fundido conforme já foi discutido na seção 3.2 e mostrado na Figura 6. Na mesma seção, estão comentados os resultados de [1] que mostram que a utilização dessas misturas proporcionou diminuição

do *humping* e aumento da velocidade de soldagem no processo TIG. Apesar das misturas Ar-H₂ serem bastante difundidas no meio industrial, principalmente para a soldagem TIG de aços inox austeníticos, de forma que é normal as empresas fornecedoras de gases terem em sua lista de gases padrão essas misturas, não foram encontradas publicações mostrando resultados de medições de pressão de estagnação do arco. Dessa forma, foram realizadas medições da pressão de estagnação do arco para a mistura com 5% de H₂ ao Argônio.

A Figura 77 mostra os resultados da medição. É possível verificar que para as 3 intensidades de corrente testadas (70, 100 e 140 A), os valores de pressão do arco para a mistura Ar-H₂ foram ligeiramente menores do que o argônio.

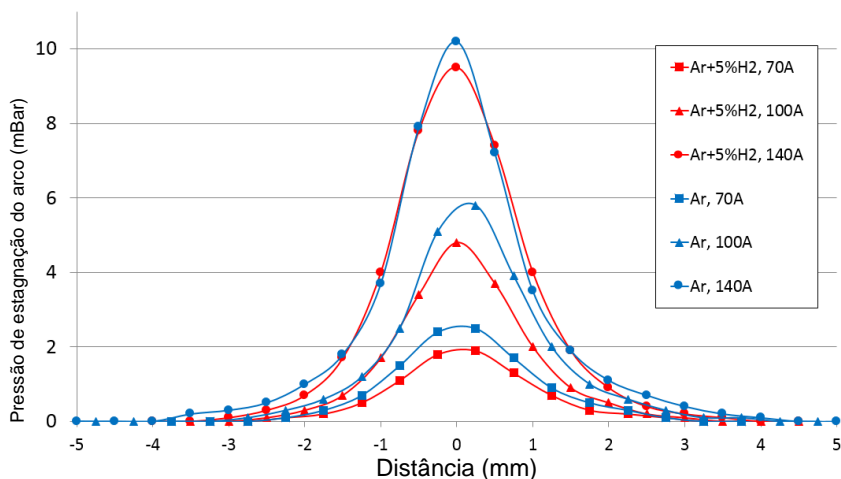


Figura 77 - Resultados da medição de pressão de estagnação do arco para o processo TIG comparando a utilização de argônio puro e de uma mistura com 5% de H₂

Esse resultado é muito interessante, pois confirma a observação da experiência prática onde não era possível notar diferenças na pressão do arco entre o argônio e as misturas com hidrogênio (avaliando o comportamento da poça de fusão durante a soldagem). Conseguir explicar por que as medições apontaram valores um pouco menores para a mistura Ar-H₂ não estava dentro das pretensões do presente trabalho, e serão estudados com maior profundidade em trabalhos futuros. É importante ressaltar uma peculiaridade observada com relação à aparência do arco usando a mistura, o qual parecia não molhar a chapa de cobre (como se tivesse um gap de cerca de 1mm entre o arco e a superfície do ânodo), fato

que também não foi investigado de maneira mais aprofundada no presente trabalho.

5.3.6. Análise da morfologia do arco no TIG-DE em corrente e velocidade elevadas

Descrição dos ensaios

Nas seções anteriores foi possível caracterizar alguns aspectos importantes do comportamento e da morfologia do arco no processo duplo eletrodo em situações de correntes e velocidades de soldagem relativamente baixas. Como um dos objetivos do trabalho é a soldagem em elevada velocidade (maior que 1 m/min) e elevadas correntes (maiores que 300 A em cada eletrodo), naturalmente existe o interesse em caracterizar o comportamento do arco nessas situações. Os eletrodos utilizados para os testes foram todos afiados com ângulo em 20° e tronco de cone com 2 mm de diâmetro.

Para isso, foram realizadas filmagens do arco usadas para análise em conjunto com as aquisições dos sinais de tensão em cada eletrodo. Foram realizados ensaios usando cobre como ânodo procurando retirar do ensaio a influência do metal fundido e da poça de fusão (como a deformação da superfície do ânodo quando o mesmo se deforma, por exemplo). Para isso foi utilizada uma chapa de cobre com dimensões 330 x 100 x 23mm, que foi fixada e acoplada com pasta térmica sobre um bloco de cobre refrigerado por água, permitindo assim a realização de ensaios sem fundir o ânodo. A Figura 78 mostra uma imagem da chapa de cobre utilizada como ânodo para a caracterização do comportamento do arco.

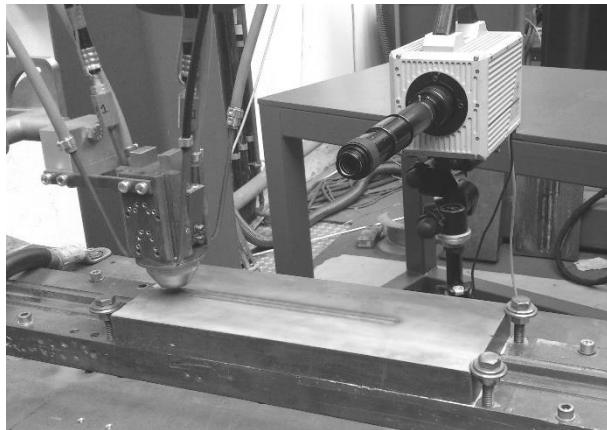


Figura 78 - Chapa de cobre utilizada para realização da filmagem em alta velocidade para caracterizar o comportamento do arco

Resultados e discussões

A Figura 79 mostra o aspecto do arco obtido por filmagem em alta velocidade, e também o valor de tensão média em cada eletrodo nas diferentes condições estudadas. As imagens foram feitas com a câmera de alta velocidade, sem a utilização de filtros, mas sim, utilizando um tempo de exposição bem pequeno (1.10^{-6} s). Dessa forma foi possível revelar as regiões de maior luminosidade do arco, que equivalem a região onde o fluxo de corrente é maior.

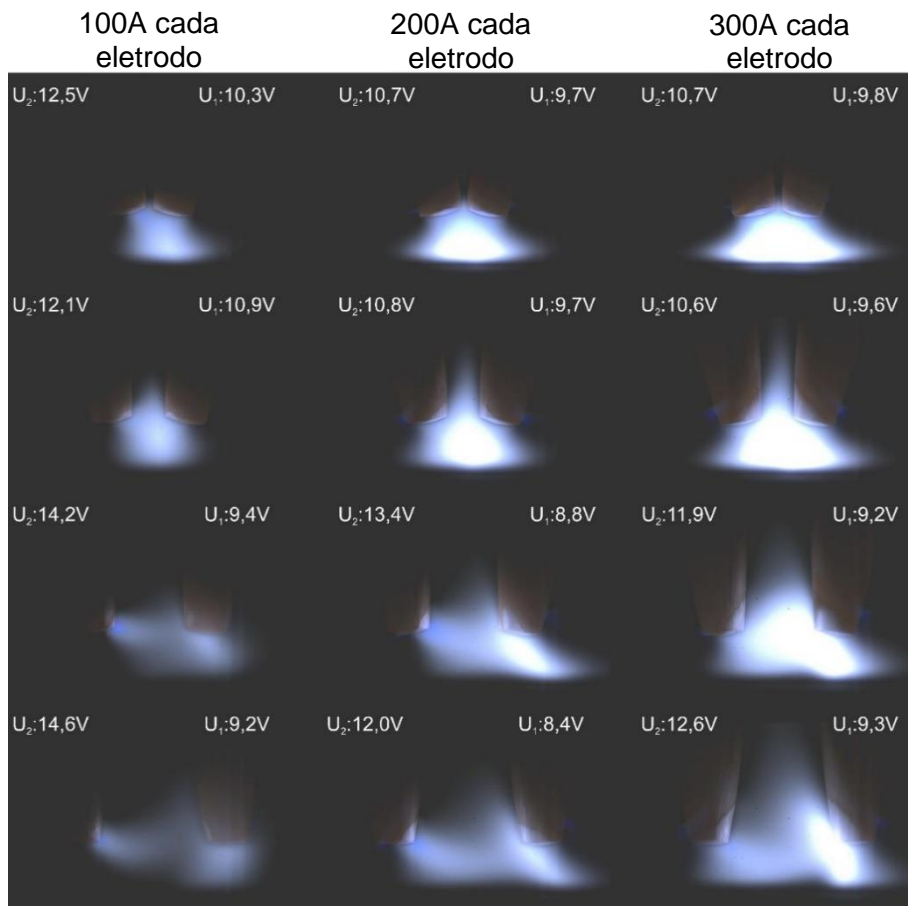


Figura 79 – Imagens da morfologia do arco e tensão média em cada eletrodo para o processo TIG-DE com diferentes correntes e diferentes distâncias entre os eletrodos (a distância nas imagens da 1ª linha da figura foi 0,5 mm, na 2ª linha foi 2 mm, na 3ª linha foi 4 mm, e na 4ª linha foi 5,5 mm; Vs: 0,6 m/min; Sentido da soldagem ←)

Analisando os quadros desta figura é possível verificar que em todas as condições a região de maior luminosidade do arco não está posicionada de maneira simétrica entre os dois eletrodos, mas sim, assumindo uma posição mais próxima do eletrodo que está atrás, com uma tendência do arco aparentar um desvio em sentido posterior ao sentido de soldagem. É possível verificar que essa tendência da região mais luminosa do arco estar deslocada para trás aumenta conforme a distância entre a ponta dos dois eletrodos foi aumentada. É importante destacar que a observação do processo em uma situação dinâmica (como já é possível notar nas imagens

mostradas usando velocidade de soldagem de 0,6 m/min, por exemplo) difere bastante da observação quando o processo está em condições estáticas ou velocidades de deslocamento pequenas.

Na situação estática, o arco formado por cada eletrodo desvia de maneira igual para a região central entre os dois eletrodos, formando um arco híbrido com distribuição simétrica. Como já discutido anteriormente, esse desvio do plasma na região central entre os eletrodos é particularmente prejudicial para o processo, uma vez que provoca aquecimento excessivo da tocha e dos eletrodos, além da tendência de diminuir a eficiência de fusão do processo. O fato da observação do aspecto do arco na situação dinâmica mostrar essa tendência de desvio para trás, de certa forma representa uma diminuição na intensidade do desvio do arco em direção contrária a peça, sugerindo também possibilidade de aplicação do processo duplo eletrodo mesmo com distância relativamente grande entre os eletrodos, caso a velocidade de soldagem seja suficientemente grande.

Além disso, é possível notar também que o valor da tensão média foi sempre consideravelmente menor no eletrodo 1 (eletrodo que vem atrás). A observação da morfologia do arco em cada situação pode ser usada para explicar essa diferença dos valores da queda de tensão medidos em cada eletrodo. O posicionamento da região mais luminosa do arco indica maior densidade de corrente e/ou maior quantidade de gás ionizado em elevada temperatura perto do eletrodo 1. Além disso, a região onde o arco está ancorado no ânodo também está localizada mais próxima do eletrodo 1, diminuindo o tamanho efetivo da coluna do arco para esse eletrodo. Dessa forma, a tensão requerida para manter o grau de ionização necessário na coluna do arco para passagem da corrente no eletrodo 1 é muito menor em comparação com a tensão exigida para manter o arco do eletrodo 2. Também é possível verificar que a diferença de tensão aumenta com a distância entre os eletrodos, acompanhando também o aumento da excentricidade de posição da região mais luminosa do arco.

Explicar por que o arco se estabiliza dessa forma após o início da soldagem é uma tarefa difícil devido à complexidade dos fenômenos físicos envolvidos. É possível levantar algumas hipóteses. Uma delas seria a tendência da própria velocidade de soldagem contribuir para que o eletrodo da frente perdesse mais calor no seu arco, tendo em vista que a coluna do arco está em contato com uma região de gás frio. Como o segundo eletrodo tem em sua frente um gás já aquecido, o mesmo tem maior facilidade para manter o quantidade de gás ionizado necessária, requerendo assim menor tensão.

Outra hipótese que parece ter a maior significância, seria usar a explicação de que a ancoragem do arco no ânodo ocorre preferencialmente

em uma zona onde o metal de base já está fundido (devido principalmente a uma suposta existência de vapores metálicos ou óxidos que possuem menor potencial de ionização do que o próprio Ar, e facilitam a ancoragem do arco nessa regiões). É natural a tendência de existir muito mais material fundido próximo ao eletrodo que está atrás (onde de fato existe a poça de fusão), do que próximo ao eletrodo que está à frente (onde o material ainda está sólido). Como no processo TIG-DE a rigidez do arco parece ser consideravelmente menor do que o processo com eletrodo único, o arco seria desviado para trás com maior facilidade, procurando se estabelecer em uma região onde é mais fácil a coluna do arco manter o grau de ionização necessário (que nesse caso acaba sendo a parte mais próxima do eletrodo que está atrás). Apesar do ensaio ter sido realizado em uma chapa de cobre que não fundia, não se sabe até que ponto houve ou não a emissão de vapores metálicos. De qualquer forma, o efeito do desvio do arco foi observado de maneira idêntica nos ensaios realizados sobre o bloco de cobre refrigerado por água e sobre aço carbono.

É possível notar ainda, que o eletrodo 1 está mais aquecido do que o eletrodo 2, então parte dessa diferença de tensão também pode vir da diferença de aquecimento dos eletrodos (questão que será abordada no Capítulo 6).

Para eliminar possíveis dúvidas com relação ao desvio do arco discutido nos parágrafos anteriores ser causado por algum fator externo (como um efeito causado devido à posição dos cabos, ou particularidade específica de um dos eletrodos, por exemplo), foi realizado um ensaio invertendo a direção de movimento durante a soldagem. A Figura 80 mostra as imagens do aspecto do arco em diferentes momentos e a aquisição de tensão resultante desse ensaio. Nesse caso, a velocidade de soldagem foi de 0,6 m/min nas duas direções, e o movimento foi invertido 4 s após a abertura do arco. É possível notar que antes da inversão de direção, o arco está desviado para a direção contrária à direção de movimento, e a tensão é menor para o eletrodo que está atrás (da mesma forma como observado anteriormente nas imagens da Figura 79). No momento da inversão é possível notar que a região de desvio do arco fica centralizada entre os dois eletrodos, e nesse momento a tensão nos dois eletrodos também se iguala. Após a inversão de movimento, o desvio do arco tende novamente a ser em direção contrária à direção de movimentação, e a tensão no eletrodo que está atrás volta a ser menor. É possível notar também que logo após a inversão do movimento, a tensão do eletrodo que agora está atrás (nesse caso o eletrodo 1), fica por cerca de 3 s em um valor um pouco menor (cerca de 11 V), e depois desse tempo assume valores maiores (superiores à 13 V).

Foi realizado um outro ensaio semelhante, mas dessa vez a mudança de direção foi feita por duas vezes, e a primeira inversão de movimento ocorreu 7 s após o início da soldagem, e a segunda inversão de movimento foi realizada 7 s após a primeira. A Figura 81 mostra esses resultados. Desta vez é possível verificar que após a primeira inversão, o arco se mantém por um tempo maior (cerca de 4 s) no centro dos dois eletrodos, deixando a tensão do arco com valores iguais por esse tempo. Fato semelhante ocorre após a segunda inversão de movimento, mas dessa vez, as tensões mantêm valor semelhante por um tempo maior (cerca de 8 s). Não se sabe explicar o porquê, mas a hipótese levantada é que esse comportamento seja causado pelo aquecimento do eletrodo em conjunto com a afiação do eletrodo utilizada.

Uma hipótese levantada é que a afiação com tronco de cone de 2 mm de diâmetro faz com que se tenha uma área catódica relativamente grande a ser mantida aquecida no eletrodo, fazendo com que para a corrente de 200 A, ainda não se tenha a temperatura suficientemente elevada para que se obtenham os menores valores da função trabalho para emissão de elétrons, sendo necessário também maior tensão do arco (porém, os resultados que estão mostrados no Capítulo 6 não corroboram essa hipótese proposta, pois as diferenças encontradas foram valores de tensão muito pequenos). Por conta disso, o arco tende a ficar centralizado alguns momentos após a inversão de sentido, pois o eletrodo que estava atrás, já estava aquecido. No caso do eletrodo que vem na frente, essa combinação de uma área do cátodo grande, e corrente relativamente pequena, pode contribuir para que o arco se estabeleça mais na aresta que fica na posição central da tocha, contribuindo para que o arco apresente esse formato mostrado no quadro que retrata a condição 12 s da Figura 81. Isso sugere também, que se o diâmetro do tronco de cone do eletrodo fosse diminuído, talvez o comportamento do arco seria um pouco diferente, tendendo para uma distribuição central dos eletrodos por mais tempo. De qualquer forma esses resultados (grande variação da posição do arco) mostram a tendência de maior instabilidade e baixa rigidez do arco para o processo TIG-DE quando se utiliza afastamento entre os eletrodos semelhantes ao que é mostrado nesses ensaios.

A Figura 82 mostra um ensaio realizado com 300 A em cada eletrodo, mas dessa vez, o ensaio foi realizado em uma chapa de aço carbono com 10 mm de espessura. Foram utilizadas diferentes velocidades de soldagem no mesmo cordão (a velocidade de soldagem foi aumentada de 0,3 m/min, para 0,6 m/min e posteriormente 1,2 m/min). É possível verificar que para a velocidade de 0,3 m/min o arco apresentou certa instabilidade (ou baixa de rigidez do arco), sendo que nos primeiros

instantes estava desviado para o eletrodo da frente, e posteriormente foi desviado para o eletrodo de trás sem que houvesse motivo aparente (exceto o início da chapa). Com o aumento da velocidade de soldagem para 0,6 m/min e posteriormente 1,2 m/min foi possível notar que o arco se posiciona cada vez mais desviado próximo ao eletrodo que está atrás. No sinal da tensão também é possível verificar que o valor médio para o eletrodo que está atrás tende a diminuir, e tende a aumentar no eletrodo que está na frente. De maneira geral, o comportamento observado nesse ensaio (utilizando 300 A em cada eletrodo e soldando sob chapa de aço carbono), foi semelhante ao observado nas imagens da Figura 79 (utilizando 200 A em cada eletrodo com o arco estabelecido no bloco de cobre).

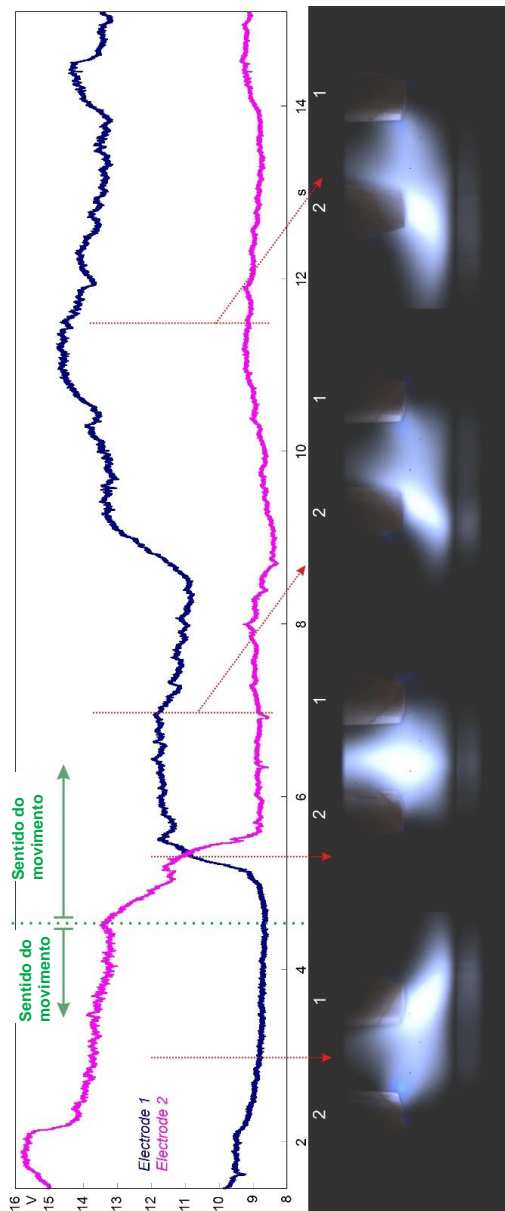


Figura 80 – Sinais de tensão de cada eletrodo e imagens do aspecto do arco nos diferentes momentos do ensaio realizado mudando a direção de movimentação com o processo TIG duplo eletrodo. (Corrente em cada eletrodo: 200 A, Vs: 0,6 m/min)

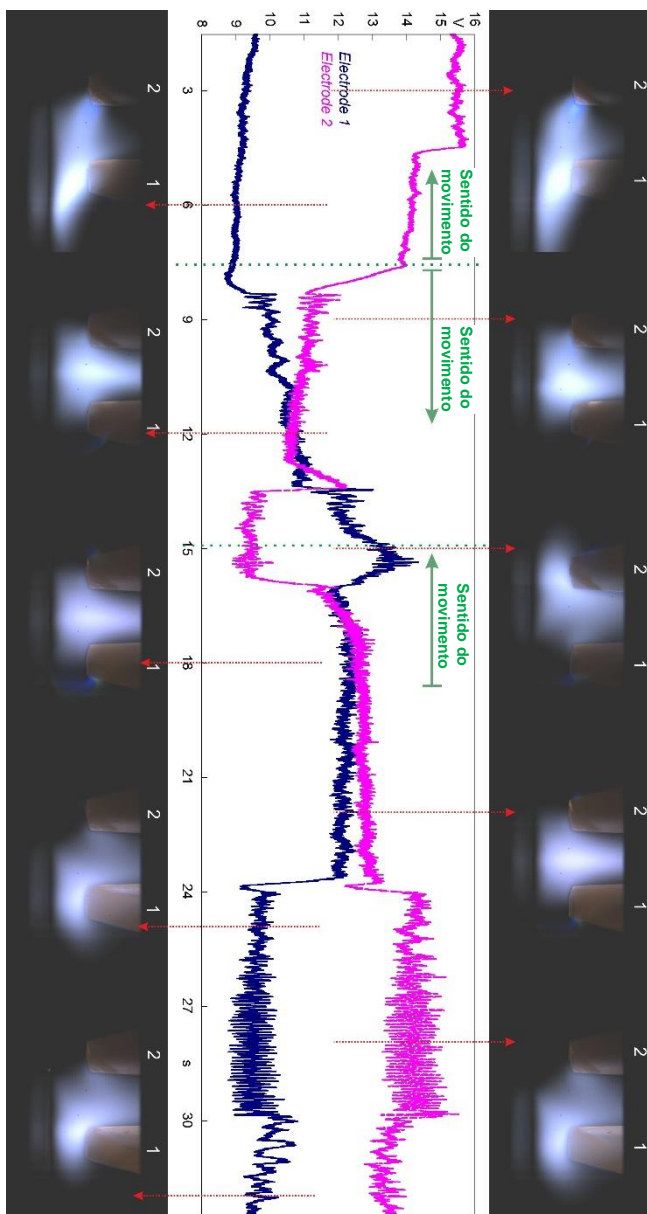


Figura 81 - Sinais de tensão de cada eletrodo e imagens do aspecto do arco nos diferentes momentos do ensaio realizado mudando a direção de movimentação com o processo TIG duplo eletrodo. (Corrente em cada eletrodo: 200 A, Vs: 0,6 m/min)

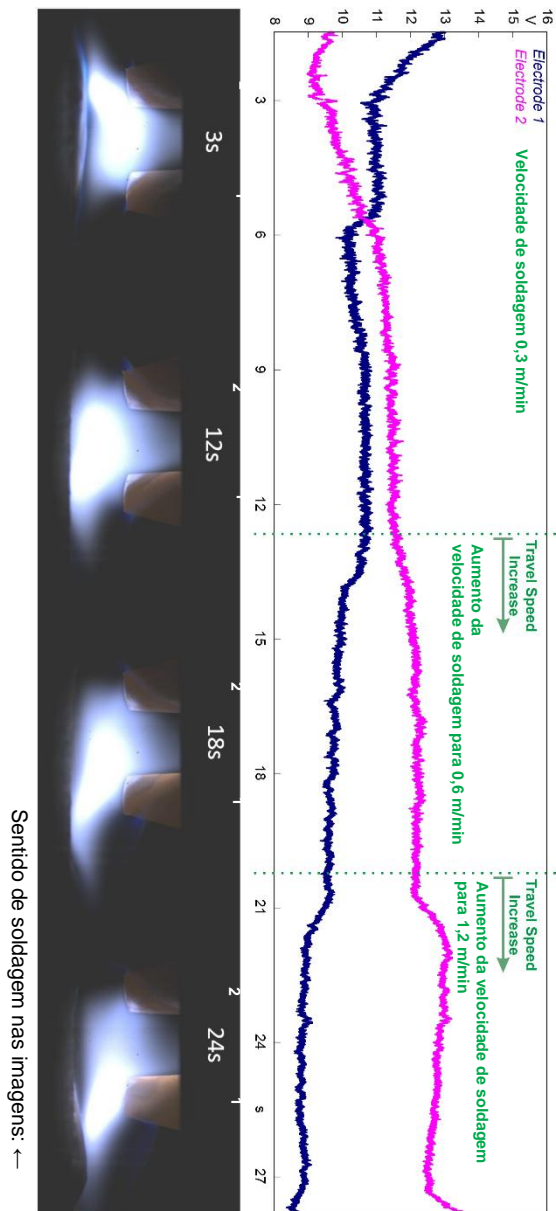


Figura 82 - Sinais de tensão de cada eletrodo e imagens do aspecto do arco nos diferentes momentos do ensaio com o processo TIG duplo eletrodo alterando a velocidade de movimentação. (Corrente em cada eletrodo: 300 A)

5.3.7. Testes de soldagem tipo cordão sobre chapa usando TIG-DE

Descrição dos ensaios

Foram realizados testes tipo cordão sobre chapa com o objetivo de avaliar o desempenho do processo duplo eletrodo com relação à velocidade máxima sem surgimento de defeitos (*humping*). Esses testes serviram também para obter dados sobre a eficiência de fusão do processo. O principal parâmetro variado foi o afastamento entre os eletrodos. Os ensaios foram realizados utilizando 0,5, 3 e 5 mm de afastamento.

Para esses testes, foram escolhidas três diferentes velocidades de soldagem: 0,4, 0,8 e 1,2 m/min. Visando possibilitar a avaliação em diferentes condições de maneira simplificada, foi adotada a metodologia de soldar com as três velocidades no mesmo corpo de prova, de maneira sequencial. O controle eletrônico da mesa de soldagem comandado via PC permitiu soldar trechos com 100 mm de extensão usando cada uma das velocidades no mesmo cordão de solda (iniciando da menor para a maior velocidade). Foram utilizadas chapas de aço baixo carbono convencional RSt 37-2 (que é um tipo de aço carbono baixa liga classificado segundo a norma alemã) com 10 mm de espessura e dimensões 80 x 350 mm, que foram limpas usando jato de areia e escovadas com escova de aço antes de todos os ensaios. Para todos os ensaios a DEP foi mantida em 3 mm. Nos testes com o TIG-DE foi usado 300 A de corrente constante em cada eletrodo. Para efeito de comparação, foram conduzidos testes nas mesmas condições com o processo TIG convencional usando corrente de 300 A e 400 A. A Figura 83 mostra uma imagem da chapa de aço fixada na mesa de soldagem. Em todos esses ensaios o gás de proteção utilizado foi argônio puro.

Conforme foi possível verificar nos ensaios de medição da pressão de estagnação do arco mostrados no item 5.3.5, o formato da ponta do eletrodo pode influenciar grandemente os valores de pressão do arco agindo sobre a poça de fusão. Como o objetivo era utilizar as condições que não favorecessem a formação de defeitos, foi escolhido utilizar a afiação em tronco de cone em 2 mm de diâmetro. Para exemplificar o que aconteceria se os ensaios fossem conduzidos com eletrodo com afiação tradicional (pontiaçuda), a Figura 84 mostra um corpo de prova soldado com o processo TIG convencional usando afiação pontiaçuda em ângulo de 45°. É possível notar o surgimento de *humping* paralelo em toda a extensão do corpo de prova. Na figura também estão mostrados os pontos onde a velocidade de soldagem foi aumentada.

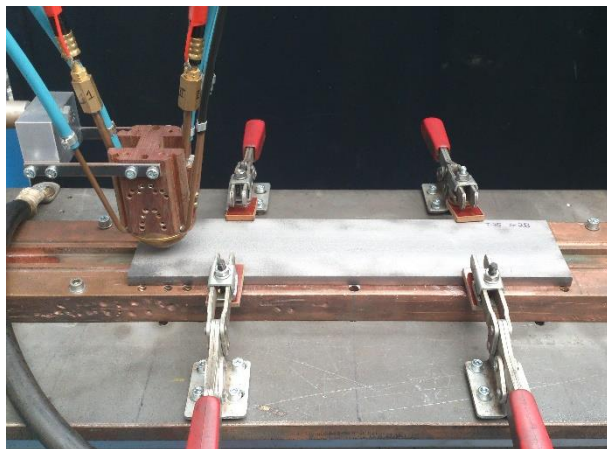


Figura 83 - Corpo de prova posicionado para ensaio de soldagem tipo cordão sobre chapa

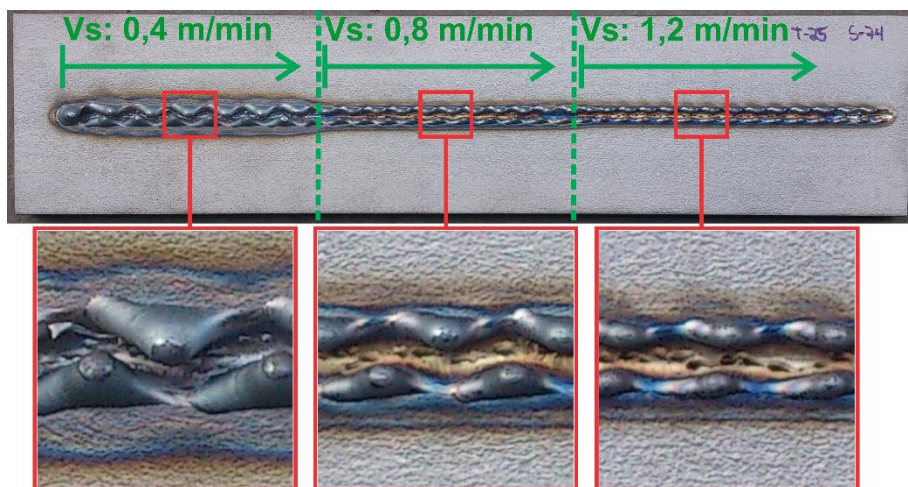


Figura 84 – Ensaio tipo cordão sobre chapa realizado com 3 trechos de velocidades diferentes, mostrando a formação de *humping* que ocorre quando se utiliza um eletrodo com ponta convencional (eletrodo pontiagudo)

Para que fosse possível obter algum indicativo da eficiência de fusão em cada situação e possibilitar também comparações com o TIG convencional, as amostras dos cordões realizados foram cortadas e a área fundida da seção transversal foi medida. Retirou-se duas seções transversais de cada trecho soldado com velocidade diferente. Posteriormente, as amostras foram preparadas metalograficamente, e

atacadas com Nital 4% para revelar a zona fundida. Essas amostras foram fotografadas utilizando um estereoscópio e a área fundida foi medida utilizando um software de análise de imagens “*Image J1.x*”. Para todas as medições considerou-se somente a área fundida abaixo da linha da superfície da chapa, independente se na seção escolhida, parte do metal solidificou acima da linha da chapa, ou abaixo da mesma. O valor da área fundida apresentado foi o resultado da média das duas seções transversais analisadas.

Resultados e discussões

A Figura 85 mostra o aspecto da superfície obtida nos ensaios tipo cordão sobre chapa usando o TIG convencional e o TIG-DE com as diferentes distâncias entre os eletrodos. No processo convencional é possível observar que não ocorre *humping* para a corrente de 300 A mesmo na maior velocidade. Usando 400 A ocorre surgimento de mordeduras na velocidade de 0,4 m/min, enquanto para as velocidades 0,8 e 1,2 m/min ocorre *humping*. Para o processo duplo eletrodo, mesmo utilizando 300 A em cada eletrodo, significando corrente total de 600 A, foi possível obter cordões sem surgimento de *humping*, principalmente para a velocidade de soldagem mais elevada.

O surgimento do *humping* no processo TIG convencional é descrito como um problema que começa a ocorrer a partir de uma velocidade limite, ou seja, para velocidades baixas o cordão não apresenta defeito e à medida que a velocidade de soldagem vai sendo aumentada é atingida uma velocidade limite, a partir da qual o cordão tenderia a apresentar somente *humping*, conforme descrito por Savage et al. [3]. Nos testes realizados com o processo duplo eletrodo ocorreu uma tendência diferente, sendo que o *humping* ocorreu de maneira pronunciada para a velocidade menor, e com o aumento da velocidade para 1,2 m/min foi possível obter um cordão contínuo. Esse é um comportamento muito interessante, pois indica boa aptidão para aplicações com velocidade de soldagem elevada. Com relação às três diferentes distâncias testadas entre os eletrodos, foi possível observar que o aumento no afastamento entre os eletrodos proporcionou maior extensão de cordão sem defeitos.

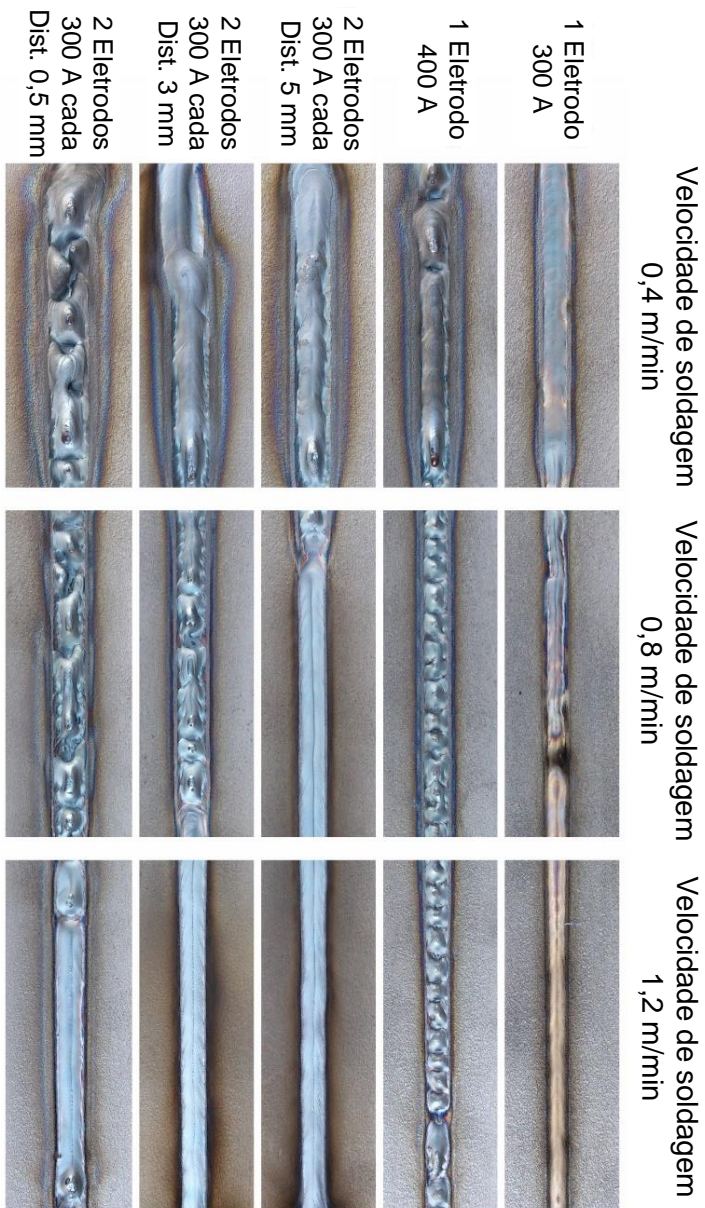


Figura 85 - Imagens do aspecto do cordão realizado com o TIG convencional e o TIG-DE com diferentes afastamentos entre os eletrodos

O fato da condição de maior afastamento entre os eletrodos ter apresentado menor formação de *humping* era de certa forma esperado e vem ao encontro dos resultados das medições da pressão do arco para esse processo mostradas na seção 5.3.4, que mostraram que os maiores valores de pressão do arco são obtidos quando o afastamento entre os eletrodos é menor. Ao aumentar a distância entre os eletrodos a pressão do arco tende a diminuir e o arco também passa a sofrer maior desvio em direção contrária à peça, como na distância de 5 mm. Dessa forma o *humping* tende a ser menor nessa situação de maior afastamento, mas também a quantidade de metal fundido tende a ser menor. Essa tendência pode ser verificada na Figura 86, que mostra os resultados da medição da área fundida para cada situação.

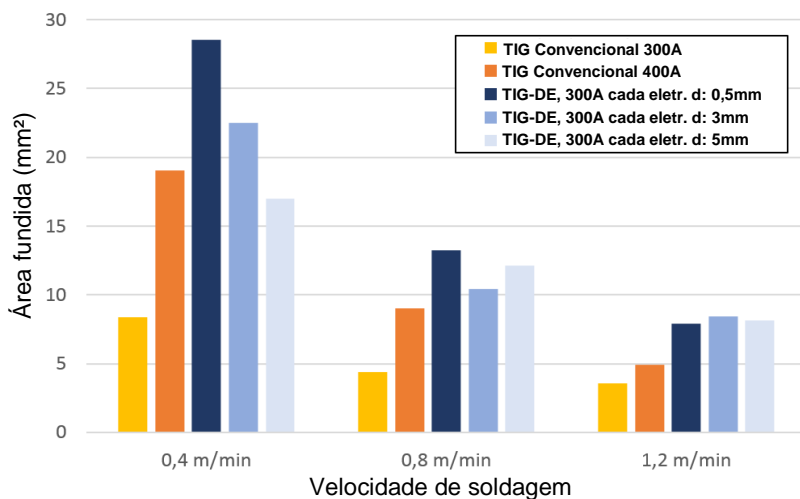


Figura 86 - Resultados da medição da área fundida comparando o TIG-DE com diferentes distâncias entre os eletrodos, como o processo TIG convencional

Analisando os resultados da área fundida do duplo eletrodo para as diferentes distâncias entre os eletrodos, fica clara a tendência de diminuição da quantidade de material fundido com o aumento da distância entre os eletrodos para a velocidade de 0,4 m/min, enquanto que para a situação de 1,2 m/min praticamente não houve diferença entre os valores da área fundida. Isso pode ser explicado pelas observações do arco mostradas na Figura 79, sendo que para as menores velocidades o arco tende a apresentar maior desvio em direção contrária à peça e isso diminui a eficiência de fusão principalmente para o afastamento de 5 mm entre os eletrodos. Já nas velocidades mais elevadas é possível observar que o arco

tende a se desviar em direção contrária ao movimento, fazendo com que a porção de arco desperdiçada devido ao desvio em direção à tocha seja menor.

É importante considerar que os mecanismos de transferência de calor podem variar bastante de acordo com a velocidade. Por exemplo, a observação da poça de fusão durante a soldagem permite inferir que geralmente nas velocidades mais baixas o arco tende a agir principalmente sob a poça de metal fundido, enquanto para as velocidades mais elevadas o arco tende a agir mais diretamente no material ainda sólido. O tempo disponível para difusão do calor ao longo da chapa também é muito maior quanto menor for a velocidade. O trabalho de Niles e Jackson [31], baseado em medições de ensaios experimentais, mostra que a eficiência de fusão aumenta em uma faixa de 10-22% com o aumento da corrente e da velocidade de soldagem. DuPont e Marder [32] também mostram significativo aumento da eficiência de fusão com o aumento da velocidade e corrente de soldagem. Da mesma forma, Fuerschbach e Knorovsky [33] também relatam significativo aumento da eficiência de fusão conforme a velocidade é aumentada em ensaios feitos com velocidade de soldagem de até 1,2 m/min.

Comparando os valores de eficiência de fusão obtidos para o processo convencional com 300 A e os valores obtidos usando o TIG-DE, é possível verificar que mesmo para as diferentes velocidades de soldagem e afastamentos dos eletrodos onde o processo duplo eletrodo apresentou menor eficiência (área fundida), os valores foram no mínimo o dobro dos valores obtidos com o processo convencional. Isso é um bom indicativo, pois significa que de maneira geral o processo duplo eletrodo não perde eficiência de fusão em relação ao processo de eletrodo simples, considerando o dobro da corrente usada com o eletrodo simples. Comparando com os resultados obtidos usando o TIG convencional com 400 A, os valores obtidos com o TIG-DE foram maiores usando afastamento de 0,5 mm entre os eletrodos e também para a velocidade de soldagem 1,2 m/min ocorreu maior fusão.

Além da questão de uma menor eficiência de fusão, foi notada uma maior contaminação dos eletrodos quando são utilizadas maiores distâncias entre os eletrodos. A Figura 87 mostra o aspecto dos eletrodos após a soldagem com cada distância, onde é possível verificar a contaminação dos eletrodos usados com 3 e 5 mm.

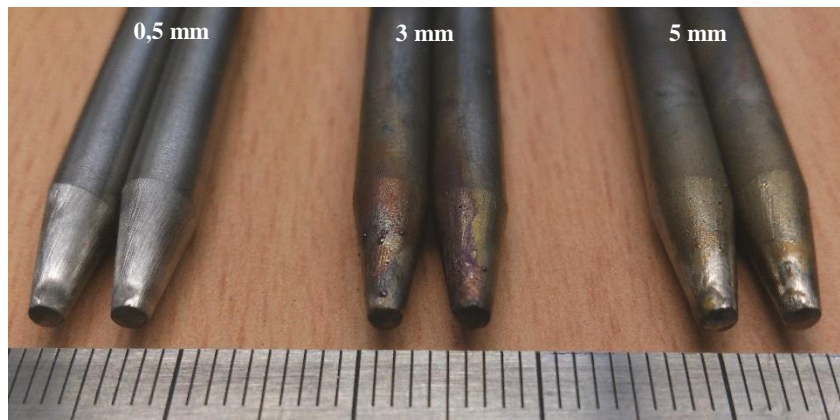


Figura 87 - Aspecto dos eletrodos após a realização de ensaio tipo cordão sobre chapa com o processo TIG-DE utilizando diferentes distâncias entre os eletrodos

5.3.8. Testes de soldagem de chapas de aço em junta sobreposta utilizando o processo TIG-DE

Descrição dos ensaios

Como já foi citado anteriormente, o estudo do processo TIG-DE iniciou dentro de um contexto onde se buscava a realização de soldagens de união de chapas de aço com aproximadamente 3 mm de espessura dispostas em junta sobreposta com o processo TIG. O objetivo era realizar essa união de maneira autógena e com elevada velocidade de soldagem (maior do que 1 m/min). Já é conhecido que a adição de percentuais de H_2 ao Ar tende a possibilitar aumento de velocidade de soldagem para esse tipo de aplicação. Apesar disso, para simplificar a comparação entre os diferentes processos, foi decidido utilizar somente argônio puro como gás de proteção.

Devido ao longo trabalho realizado com o TIG convencional, foi decidido utilizar o mesmo tipo de junta para o desenvolvimento de procedimentos de soldagem com o TIG-DE, possibilitando assim a comparação com os dois processos. Além disso, esse tipo de junta está presente em variadas aplicações industriais e os procedimentos desenvolvidos teriam um grande espaço para aplicação na indústria.

Para essa soldagem foram usadas chapas de aço carbono convencional RSt 37-2 e ABNT/SAE 1020 com dimensões 300 x 60 x 3,2 mm. Os corpos de prova foram limpos com jato de areia e escova de aço, e depois ponteados nas extremidades em junta sobreposta. A Figura

88 mostra os corpos de prova preparados para a soldagem em (a), e os corpos de prova fixados na mesa de soldagem em (b) para ensaios em posição plana. A Figura 89 mostra o corpo de prova fixado para ensaios da posição horizontal, realizados no LABSOLDA usando um robô de soldagem para movimentar a tocha.

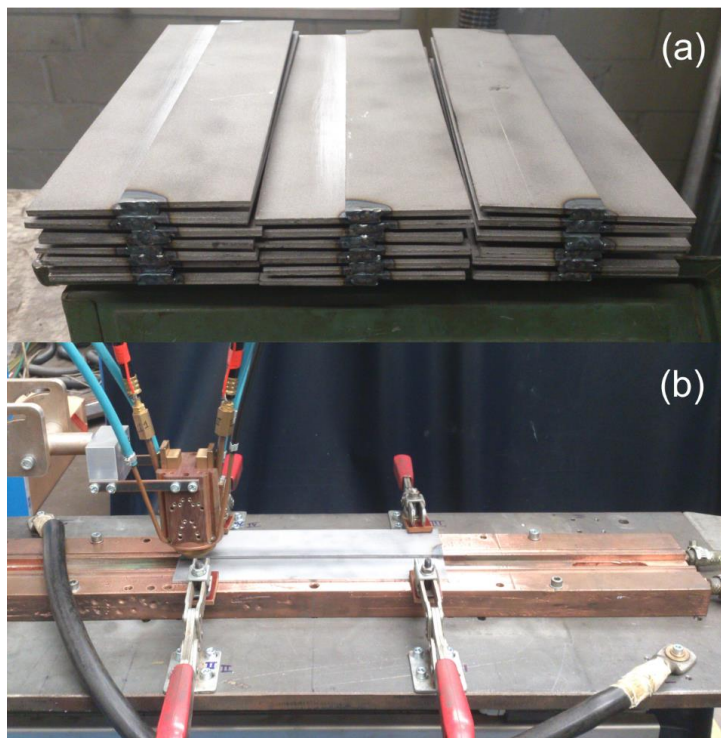


Figura 88 - Imagens mostrando os corpos de prova para ensaio de soldagem em junta sobreposta. (a) corpos de prova ponteados. (b) corpos de prova fixados na mesa de soldagem

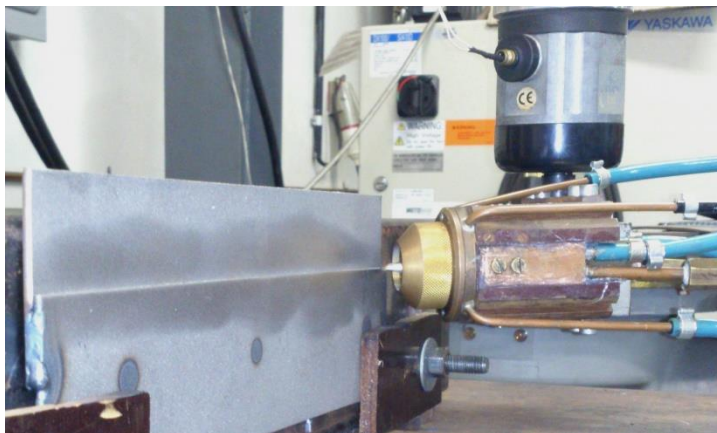


Figura 89 - Soldagem de chapas em junta sobreposta na posição horizontal

Resultados e discussões

Ao longo do trabalho foi realizada a soldagem de aproximadamente 180 juntas sobrepostas usando o TIG-DE com diferentes: configurações de posicionamento relativo entre os eletrodos; posicionamento relativo entre a tocha e a peça; DEP; velocidade de soldagem e corrente. Nesse ponto, é importante destacar a infinita possibilidade de combinação que o processo proporciona, pois além das diversas configurações de posicionamento entre os eletrodos existe ainda a questão da geometria de afiação da ponta do eletrodo e também o posicionamento relativo dos eletrodos na junta. Não será apresentado no texto do presente trabalho todas as imagens do corpo de prova de cada teste realizado e sua respectiva combinação de parâmetros utilizados, por conta do grande volume de informação que isso representa. Serão apresentados somente os comentários, informações e conclusões considerados mais importantes sobre a experiência de soldagem de chapas em junta sobreposta com o TIG-DE.

Ao iniciar os testes procurando obter um procedimento de alta velocidade, primeiramente foram realizados testes com velocidades intermediárias (0,5-1 m/min). Para essa faixa de velocidade, foi notada maior dificuldade em se obter uma junta soldada de boa regularidade com o processo duplo eletrodo do que usando o convencional. Contando com a longa experiência de soldagem dessa junta obtida no trabalho [1] utilizando o TIG convencional, foi possível obter juntas soldadas com bom aspecto e velocidade de até 0,8 m/min sem a necessidade de realização de muitas tentativas (mesmo utilizando Ar puro no gás de proteção). Para o TIG-DE, também foi possível obter juntas com velocidades semelhantes, porém, os cordões não apresentaram boa regularidade e o processo não apresentou

boa robustez (em outras palavras, ao repetir a soldagem com a mesma configuração, o cordão resultante não apresentava o mesmo aspecto). É importante ressaltar também que devido às dimensões da tocha TIG-DE, o ângulo de inclinação ficou bastante limitado e os resultados citados foram obtidos com a tocha perpendicular à peça. Para a realização da soldagem com o TIG convencional (onde foi possível obter soldagens com 0,8 m/min), a tocha pôde ser inclinada com pequenos ângulos (como o ângulo utilizado de 40°), o que permitiu a obtenção da citada velocidade (se a soldagem tivesse que ser feita com a tocha perpendicular à chapa certamente não seria possível obter essa velocidade).

Quando os ensaios de soldagem em junta sobreposta foram realizados na faixa de velocidade de 1-1,5 m/min, é possível concluir que o processo TIG-DE apresenta vantagem, uma vez que não foram obtidas juntas soldadas sem defeitos de falta de continuidade com o TIG convencional com velocidades superiores à 0,8 m/min (considerando a utilização de Ar puro no gás de proteção). Para o processo duplo eletrodo foram obtidos corpos de prova com velocidade de até 1,4 m/min. Porém, da mesma forma que nas velocidades mais baixas, os cordões apesar de contínuos, não apresentaram boa regularidade e o processo não apresentou boa robustez na repetição do resultado.

A Figura 90 mostra o aspecto do cordão que representa o resultado obtido na maioria das vezes. Na mesma figura também estão mostrados os sinais de tensão durante a soldagem. É possível verificar que o cordão apresentou irregularidades na primeira metade. Da mesma forma, os sinais de tensão mostraram irregularidade nessa primeira metade, indicando certa instabilidade do arco.

É interessante notar que no caso da soldagem em junta sobreposta, diferentemente do que ocorreu na soldagem tipo cordão sobre chapa em chapas de aço e sobre o cobre, o valor da tensão do eletrodo que está atrás foi maior do que o eletrodo que estava na frente. Isso pode ser explicado devido à pequena distância do eletrodo em relação à borda da chapa de aço que fica em cima na junta sobreposta. Para a obtenção de bons resultados, essa distância é tipicamente 1 mm (ou menor). Dessa forma, o eletrodo que está na frente age sobre o material ainda sólido da borda, resultando em uma DEP muito menor do que o eletrodo que está atrás (o qual tem o arco estabelecido com DEP efetiva muito maior).

A Figura 91 mostra outro oscilograma de soldagem (feito na posição horizontal) mostrando o mesmo comportamento descrito anteriormente e evidenciando que a diferença da queda de tensão nos dois eletrodos tem passado dos 4 V.

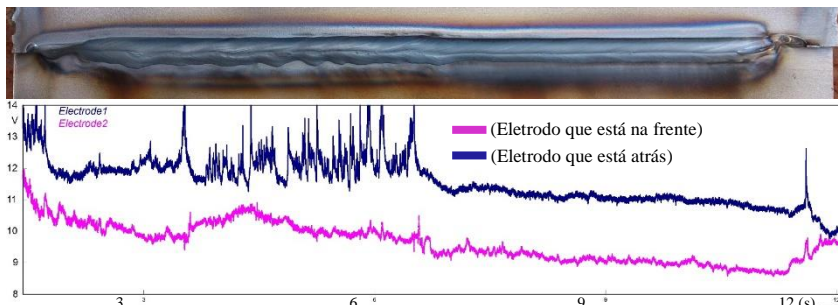


Figura 90 - Aspecto do cordão e oscilograma de tensão dos dois eletrodos de soldagem de chapas em junta sobreposta com velocidade de 1,2 m/min. Corrente em cada eletrodo: 350 A. Afastamento entre os eletrodos 5 mm

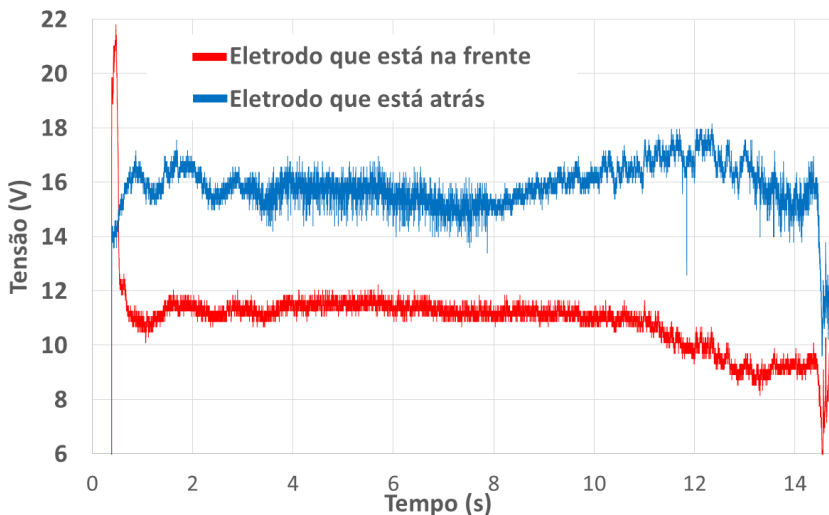
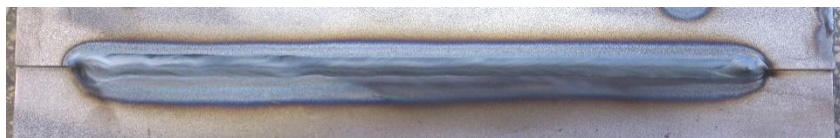


Figura 91 - Oscilograma de tensão da soldagem de chapas de aço em junta sobreposta utilizando o processo TIG-DE com velocidade de 1,2 m/min. (320 A em cada eletrodo. Afastamento entre os eletrodos: 2 mm)

Com relação ao afastamento entre os eletrodos no TIG-DE, foram obtidos melhores resultados na soldagem de chapas em junta sobreposta usando afastamentos entre 3-5 mm, do que usando afastamentos menores.

Nos ensaios na posição horizontal, foi possível obter bons resultados usando velocidade de até 1,2 m/min usando o TIG-DE. Nessa situação, a tocha de soldagem foi inclinada a 60°, que é o menor ângulo possível de inclinar a tocha devido às suas dimensões. O processo se mostrou repetitivo, uma vez que soldando 10 corpos de prova todos apresentaram continuidade no cordão soldado. Apesar disso, o aspecto do cordão não apresentou

excelente regularidade, sendo possível notar sempre ondulações em sua superfície, conforme mostrado na Figura 92.



**Figura 92 - Corpo de prova soldado usando o TIG-DE com 1,2 m/min. Gás: Ar puro.
Corrente: 320 A em cada eletrodo**

Apesar do TIG-DE ter possibilitado um aumento de velocidade de soldagem de 50% em relação ao TIG convencional, a expectativa era a obtenção de resultados ainda melhores. O principal problema apontado foi a pior regularidade do cordão em comparação com o processo convencional, fato atribuído à menor rigidez do arco formado no processo duplo eletrodo. A rigidez do arco é um critério difícil de avaliar, uma vez que não é possível sua medição direta, possuindo caráter quase que puramente qualitativo. A observação do arco nessa situação mostra que o mesmo fica mudando de posição sobre a poça de fusão durante a soldagem. Realizando filmagens em alta velocidade, também foi possível verificar essa variação da posição do arco conforme mostrado na sequência de imagens da Figura 93.

Comparativamente, o arco do processo convencional apresenta rigidez muito maior, fato atribuído à dois fatores: O primeiro fator é que a maior corrente utilizada em um único eletrodo no TIG convencional tende naturalmente a produzir um campo magnético auto induzido muito mais forte do que no caso do processo TIG-DE (que utiliza valores menores de corrente em cada eletrodo), aumentando assim a rigidez do arco. O segundo fator é a interação magnética dos dois arcos no TIG-DE, que faz com que o processo não tenha uma situação de estabilidade bem definida e diminua ainda mais a rigidez dos arcos.

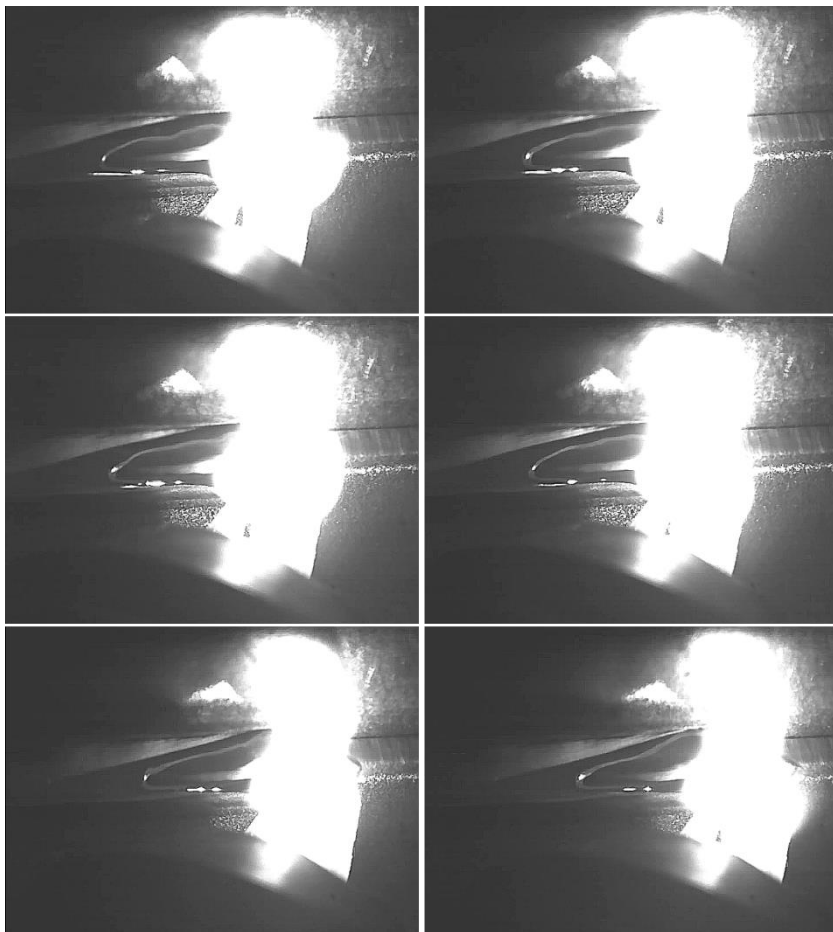


Figura 93 – Quadros da filmagem em alta velocidade do processo TIG-DE na soldagem de chapas de aço com 3,2 mm de espessura em junta sobreposta mostrando instabilidade do arco. (Tempo de exposição: 3 μ s. Vs: 1,2 m/min. Corrente em cada eletrodo: 320 A)

Nesse exemplo de aplicação (soldagem em junta sobreposta), outro fator observado que contribui para a maior estabilidade e regularidade do cordão no processo convencional é o posicionamento do arco em relação à poça de fusão. Devido ao ângulo usado no processo convencional, o arco age principalmente sob o metal ainda não fundido, sem causar instabilidade na poça, como pode ser observado no quadro (a) da Figura 94. Para o caso do TIG-DE, devido às maiores dimensões do arco (que é provido por dois eletrodos) e principalmente devido à limitação do ângulo da tocha, o arco age diretamente sobre a poça como pode ser verificado na Figura 94 (b).

Dessa forma, qualquer mudança nos pontos de ancoragem do arco tende a espalhar o metal líquido de forma irregular, resultando na menor regularidade do cordão observada nas soldagens.

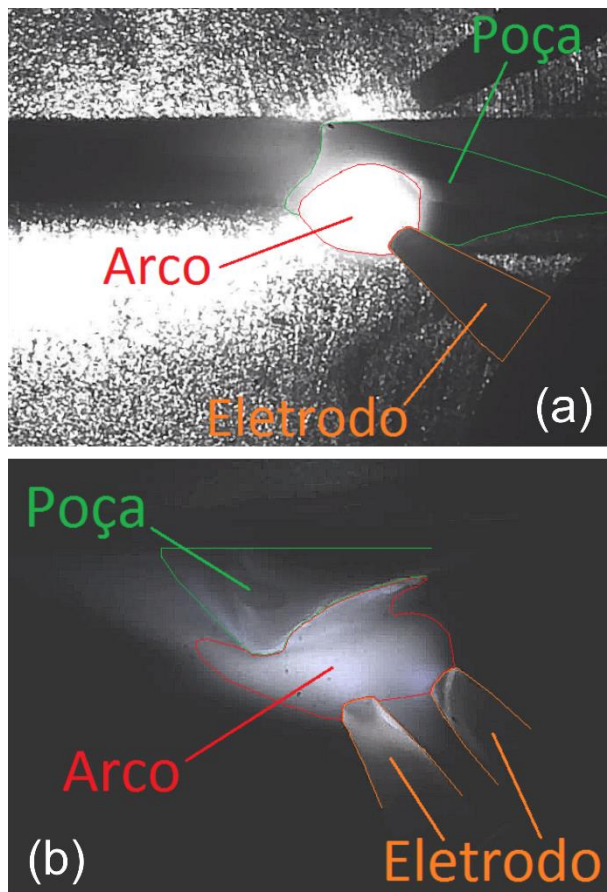


Figura 94 - Imagens obtidas com filmagem de alta velocidade mostrando a soldagem de chapas de aço em junta sobreposta em (a) utilizando o processo TIG convencional, e em (b) utilizando o processo TIG-DE. (Tempo de exposição 3 μ s em (a) e 2 μ s em (b))

Acredita-se que a possibilidade de utilização de menores ângulos no TIG-DE poderia melhorar o desempenho do processo para a soldagem de chapas de aço em junta sobreposta, da mesma forma que faz no processo TIG convencional. Por conta disso, será fabricada um novo modelo de tocha duplo eletrodo (que será testada em trabalhos futuros) com menores dimensões na região do bocal, a qual permitirá utilizar menores ângulos em

relação à peça. Para que se obtenha as menores dimensões requeridas na nova tocha, a mesma terá que ser construída sem a flexibilidade de ajuste de diferentes ângulos e posições entre os eletrodos.

6. CARACTERÍSTICA ESTÁTICA DO ELETRODO COM PONTA TRONCO DE CONE

Ao longo de todo o trabalho com soldagem TIG de elevada produtividade, sempre foi verificada a grande importância da afiação do eletrodo de tungstênio, em especial o uso da ponta em tronco de cone quando se utiliza elevada corrente de soldagem. Essa afiação foi fundamental para a obtenção de elevada velocidade na soldagem de chapas em junta sobreposta mostrada na dissertação de mestrado [1], possibilitando o aumento da velocidade de soldagem sem surgimento de *humping*.

Durante o presente trabalho foram realizadas medições mostrando que a utilização de afiação truncada diminui consideravelmente a pressão de estagnação do arco. Por conseguinte, afiação em forma de tronco de cone com 2 mm de diâmetro de ponta foi extensivamente utilizada ao longo dos ensaios empregando o TIG-DE. Tanto nos ensaios sobre chapa, como na soldagem em junta sobreposta, foram observadas diferenças nos valores de tensão entre o eletrodo que está na frente, e o que está atrás. Porém, nos ensaios cordão sobre chapa, a maior tensão foi observada no eletrodo que estava à frente, e nos ensaios em junta sobreposta ocorreu o contrário. Em ambas situações os eletrodos estavam com afiação truncada.

Diante da elevada importância que a questão da geometria do eletrodo apresenta para o trabalho, e também considerando a falta de trabalhos publicados sobre o assunto, considerou-se que seria importante a realização de ensaios para verificar a característica estática, comparando o eletrodo com e sem a utilização de ponta em tronco de cone. O objetivo inicial seria verificar se os resultados mostram algum indício que a afiação truncada por si só tende a causar modificação na tensão, as quais possam ter influenciado os resultados discutidos ao longo do presente trabalho.

Como já citado no parágrafo anterior, a análise de característica estática que será apresentada na sequência foi motivada por conta da afiação do eletrodo. Porém, ao longo da pesquisa buscando publicações sobre o tema, foi possível notar que apesar de ser um tema bastante difundido e considerado muitas vezes como assunto dominado (geralmente é citado na revisão bibliográfica da maioria das teses e dissertações), não são encontrados trabalhos atuais que discutam essa questão de forma mais aprofundada, sendo essa uma motivação adicional para as análises seguintes.

6.1 REVISÃO E DISCUSSÃO SOBRE O TEMA

De maneira geral, é conhecido que a característica estática do processo TIG convencional usando argônio puro no gás de proteção apresenta para baixas correntes um formato aproximado de uma letra U. Isso pode ser verificado na Figura 95 que mostra dados de Busz e Finkelburg [34], e nos gráficos da Figura 96 (a) do trabalho de Vilarinho [35], que mostra que a tensão atinge um valor mínimo para 100 A (denominada muitas vezes como ponto de transição da curva de característica estática). Os dados de Dutra [36], mostrados na Figura 96 (b), também mostram comportamento semelhante, porém com valores mínimos próximos à 50 A em diferentes DEP.

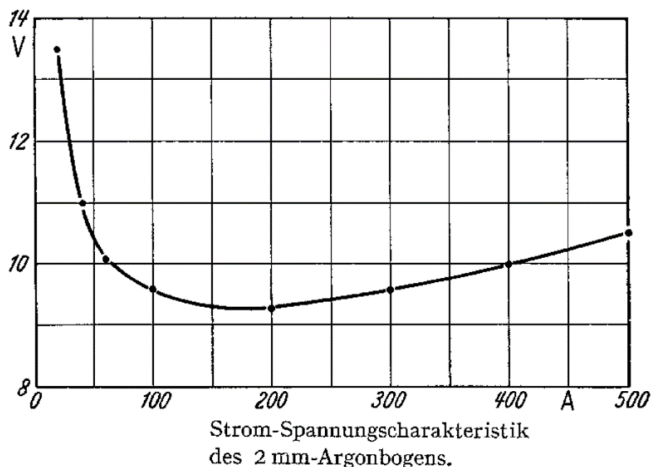


Figura 95 - Característica estática para o processo TIG usando argônio e DEP 2 mm. Levantamento realizado sobre ânodo de cobre refrigerado [34]

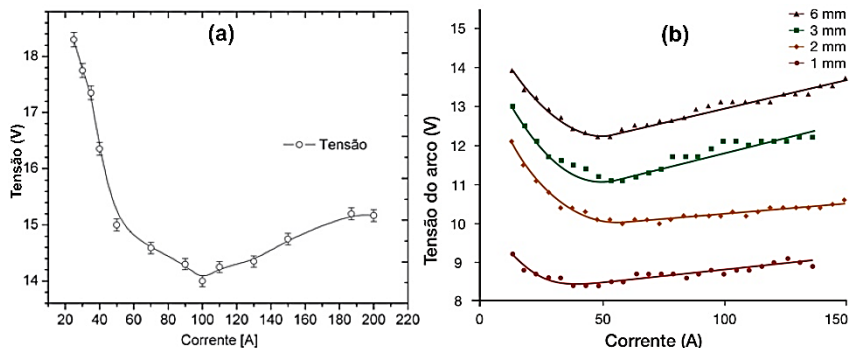


Figura 96 - Característica estática para o TIG. (a) Dados de Vilarinho [35] (DEP 5 mm, EWTh-2; 3,2 mm de diâmetro afiado em 60°, ensaios usando ânodo de cobre); (b) dados de Dutra (EWTh-2; 3,2 mm de diâmetro afiado em 30°, ensaios usando ânodo de aço) [36]

São encontradas na literatura diferentes teorias para explicar a diminuição dos valores de tensão à medida que a corrente é aumentada para a faixa de baixas correntes (geralmente abaixo dos 100 A).

O livro *The Physics of Welding* [37] reúne uma compilação de resultados de diferentes autores com relação a esse assunto, que mostram concordância quanto à diminuição da tensão quando se aumenta a corrente dentro de uma faixa que vai de 20 até 100 A. No entanto, nenhuma explicação é proposta para este fenômeno.

Segundo Vilarinho [35], o fato da tensão ser maior para as correntes baixas e diminuir conforme se aumenta a corrente, até atingir um valor mínimo em 100 A, é devido ao aumento da temperatura do plasma, que favorece a condução de elétrons através deste, e conseqüentemente proporciona um aumento da sua condutividade elétrica. O autor alega ainda que, conforme a corrente é aumentada (na faixa entre 20-100 A), não se faz necessário o aumento do número de elétrons emitidos a partir do efeito termiônico, pois as partículas existentes já se moveriam mais rapidamente devido ao aumento da temperatura, conseguindo transportar todo o fluxo de corrente, possibilitando que a tensão requerida caia, mesmo com o aumento da corrente.

Marques et al. [38] citam que esse comportamento do arco em baixas correntes é próprio do arco elétrico, e reflete o fato de que a condução da corrente elétrica no arco é feita por íons e elétrons gerados por ionização térmica, e que quando a corrente é baixa existe pouca energia disponível para o aquecimento e ionização do meio em que o arco ocorre, resultando em uma maior dificuldade para a passagem da corrente e, como conseqüência, em um aumento da tensão elétrica do arco.

Saedi [39] explica o mesmo fenômeno afirmando que para maiores correntes, a temperatura do plasma do arco aumenta, e já que a condutividade elétrica aumenta com a temperatura, a corrente pode fluir com menor queda de potencial. Além disso, o autor cita que a área condutora do arco se torna maior e isso também diminui a tensão requerida para determinada corrente.

Para o fato da tensão novamente subir quando a corrente é aumentada para valores maiores do que 100 A, os diferentes autores também fazem proposições: Vilarinho [35] explica que com o aumento da corrente, aumentam também o número de cargas elétricas, implicando em um maior choque com íons positivos e maior aquecimento, levando assim à maior transferência (perda) de calor para o ambiente. Dessa forma, segundo o autor, um maior número de elétrons deveria ser emitido para suprir aqueles que estão se recombinando com íons positivos, devido à transferência de calor, sendo necessário o aumento da tensão para emitir tais elétrons. Marques et al. [38] citam que o aumento da tensão para os valores elevados de corrente é similar ao observado em uma resistência comum.

Buscando trabalhos que analisassem esses fenômenos físicos de maneira mais aprofundada, é possível apontar Zhou e Heberlein [40] que realizaram uma análise teórica da interação entre o cátodo e o arco no processo TIG. Os resultados desses autores, mostram diferentes conclusões que podem ser utilizadas para explicar o comportamento da característica estática do arco. Os autores calcularam que para baixas correntes, a corrente transportada pelo fluxo de íons representa até 50% da corrente total. Para correntes elevadas, como 500 A, o fluxo de íons seria responsável somente por 18% da corrente total, e a emissão termiônica seria responsável pelo restante. Esse resultado indica que a densidade de corrente termiônica é pequena em baixas correntes e aumenta com o aumento da corrente do arco, o que significa que a temperatura do cátodo aumenta à medida que a corrente do arco aumenta. Os cálculos do campo elétrico na superfície do cátodo realizados por esses autores mostram a diminuição desse valor à medida que a corrente aumenta. Os autores afirmam que em baixas correntes, a temperatura do cátodo é baixa e a superfície do cátodo precisa de um campo elétrico mais forte para emitir elétrons suficientes para manter o arco, mas em maiores correntes o arco teria temperatura suficientemente grande para emitir os elétrons necessários.

Voltando a analisar os gráficos da Figura 96 na região da curva em correntes maiores à região de transição, é possível notar que existem diferenças no comportamento dados fornecidos por diferentes autores. Para

alguns autores o aumento na tensão é muito mais pronunciado do que para outros. Para Vilarinho [35] o aumento foi de aproximadamente 1 V na faixa 100-200 A. Para Dutra [36], o aumento também foi de cerca de 1 V na faixa 50-150 A. Por outro lado, os dados de Busz e Finkelburg [34] mostram um aumento de tensão consideravelmente menor, sendo que foi observado cerca de 1 V para a faixa muito maior de 200-500 A. Se a análise for feita nos valores de tensão para correntes menores do que a região de transição, a diferença nos valores fornecidos por cada autor é muito maior. Essas diferenças são atribuídas às diferentes condições experimentais utilizadas. O problema é que muitas vezes os autores não registram nas publicações todas as condições experimentais que foram utilizadas nos ensaios, fato que muitas vezes gera dúvidas ou erros quando se busca a correta interpretação dos dados.

Para ilustrar o problema, cita-se uma condição experimental que normalmente não é levada em conta e/ou informada em publicações do gênero, que é o intervalo de tempo após a abertura do arco foi utilizado para realizar o cálculo dos valores de tensão apresentados. A escolha de uma metodologia que considere essa questão é importantíssima, pois existe uma tendência de modificação do valor da tensão ao longo do tempo, conforme pode ser verificado no oscilograma de tensão da Figura 97. Essa mudança no valor pode ser maior ou menor dependendo da relação entre o diâmetro e geometria do eletrodo e a corrente utilizada. É possível observar neste oscilograma que o valor da tensão diminui consideravelmente nos primeiros 10 segundos após a abertura do arco.

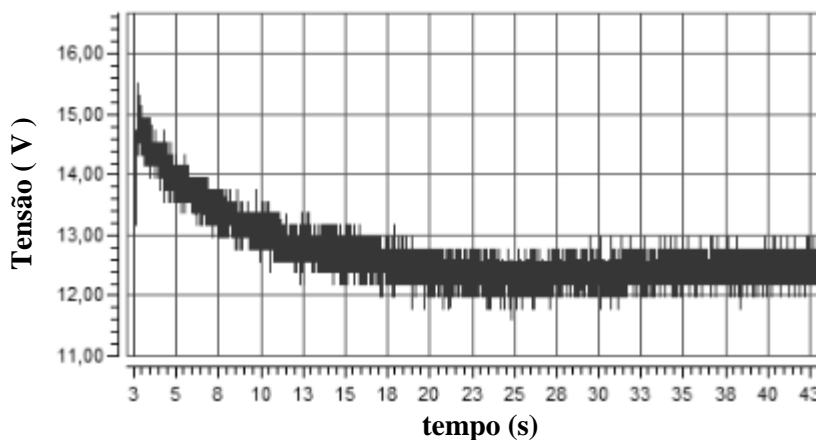


Figura 97 - Comportamento observado na aquisição do sinal de tensão (eletrodo 4,8 mm de diâmetro EWTh-2, 400 A, DEP 3 mm, ensaio realizado sobre bloco de cobre refrigerado com água)

Adicionalmente às explicações de Zhou e Heberlein [40] que foram citadas nos parágrafos anteriores, o comportamento da diminuição da tensão do arco observado na figura anterior poderia ser explicado somente pela influência do aquecimento do eletrodo, uma vez que a corrente de soldagem é a mesma ao longo de todo o período mostrado, e os tempos em questão são da ordem de segundos (tempo que seria aparentemente mais que suficiente para estabilizar a região da coluna do arco). Já é bem difundido o conhecimento que no processo TIG a passagem da corrente ocorre principalmente pela emissão termiônica (considerando a utilização do processo com o eletrodo ligado no polo negativo). Desde a década de 1920, a equação de Richardson e Dushman [41-42] (Equação 1) apresenta a densidade de corrente (J) produzida por efeito termiônico em função da temperatura do eletrodo (T). É possível notar pela equação que a densidade de corrente apresenta enorme dependência da temperatura. As outras variáveis da equação são: a constante termiônica (A) que depende principalmente do material e da temperatura do eletrodo, a carga do elétron (e); a constante de Boltzmann (k_B), e a função trabalho do material em determinada temperatura (ϕ).

$$J = AT^2 \exp\left(\frac{-e\phi}{Tk_B}\right) \quad (\text{equação 1})$$

A função trabalho (que é o potencial necessário para o material emitir um elétron) também é dependente da temperatura como mostra a Equação 2 usada por Dushman [41]. Nessa equação, a função trabalho (ϕ) diminui com a temperatura (T). As outras variáveis da equação são: a função trabalho na temperatura ambiente (ϕ_0); a carga do elétron (e); a constante de Boltzmann (k_B).

$$\phi = \phi_0 - \frac{3}{2} \frac{Tk_B}{e} \quad (\text{equação 2})$$

Desta forma, o rápido aumento da temperatura do eletrodo de tungstênio logo após a abertura do arco, proporciona a diminuição da função trabalho da superfície do cátodo. Esse aumento de temperatura acontece de forma gradual e no momento da abertura do arco, é necessário uma maior tensão para manter a emissão e fluxo de elétrons através do plasma, o que explicaria o comportamento da tensão nos 10 segundos iniciais após a abertura do arco, que é mostrado na Figura 97. Pode-se considerar ainda que outros mecanismos de emissão venham a se estabelecer até que a temperatura na superfície do eletrodo seja

suficientemente alta para que o mecanismo de emissão termiônica seja preponderante, exigindo assim, menor tensão para a manutenção do arco voltaico na intensidade de corrente escolhida.

Essa explicação fornecida nos parágrafos anteriores (considerando o aquecimento dos eletrodos e a diminuição da função trabalho), em conjunto com as explicações de Zhou e Heberlein [40] permite propor uma explicação considerada um pouco mais significativa e adequada para justificar o formato semelhante à letra U encontrada tipicamente para o processo TIG: para correntes baixas o valor da tensão é relativamente grande, uma vez que o aquecimento por efeito Joule oriundo da passagem de corrente pelo eletrodo, somado ao calor transferido pelo arco ao eletrodo, ainda não conseguem elevar a temperatura do mesmo até valores onde a função trabalho é menor. Dessa forma, é necessário um maior campo elétrico para a passagem da corrente, o qual resulta em maiores valores de tensão. Nessa faixa inicial, à medida que o valor de corrente é aumentado, a ponta do eletrodo de tungstênio atinge maior temperatura, diminuindo o valor da função trabalho e consequentemente a tensão requerida para manter o arco.

Além disso, considerando a Equação 1, é possível inferir que com a maior temperatura do eletrodo a densidade de corrente será maior (ou a área necessária para emitir a corrente desejada seja menor). Uma vez que a área de emissão necessária é menor, seria natural também esperar que a tensão requerida para emitir em uma área menor também seja menor. Logicamente o arco segue sua natureza própria seguindo a “lei do menor esforço”, e o diâmetro da zona de emissão no cátodo tende a aumentar com o aumento da corrente (tendência que também é mostrado nos cálculos de Zhou e Heberlein [40]).

Para a faixa de corrente maior do que o ponto de transição (onde de acordo com os dados da maioria dos autores os valores de tensão voltam a aumentar), o presente trabalho cita três fatores que seriam responsáveis por esse aumento de tensão com o aumento de corrente:

O primeiro fator seria a natural tendência de aumento de tensão quando se aumenta a corrente, uma vez que para possibilitar a condução de maior intensidade de corrente pelo arco, seria necessário aumentar o grau de ionização ou as próprias dimensões da coluna do arco, requerendo assim maior energia que resulta no aumento da tensão no circuito de soldagem.

O segundo fator seria um aumento da resistividade do eletrodo em função da elevação da temperatura do eletrodo (oriundo do aquecimento por efeito Joule e do calor transmitido para o eletrodo pelo arco).

O terceiro fator é o aumento da tensão oriunda da modificação da superfície do ânodo (nos casos onde o mesmo funde). Quando os ensaios

são realizados em aço, fica impossível separar as diferentes contribuições (da zona catódica, anódica e coluna do arco) para o resultado do valor de tensão observado. Acredita-se que muitos leitores e até mesmo alguns autores possam chegar a conclusões erradas por não fazerem as devidas considerações sobre essa questão (principalmente porque a variação da superfície do ânodo tende a ser extremamente significativa em correntes elevadas).

Um exemplo de conjunto de dados que poderia ser mal interpretado está mostrado na Figura 98. Os dados são do trabalho de Olivares [2], onde o objetivo não era propriamente o levantamento de característica estática, mas sim a realização de comparações do uso de diferentes eletrodos e tochas de soldagem, feitas por meio de medições da tensão do arco para várias correntes. É possível verificar que em todos os casos os valores de tensão aumentaram consideravelmente na faixa de corrente estudada (100-500 A), sendo que em alguns casos os valores aumentaram mais de 10 V. Esse resultado poderia ser erroneamente classificado como um levantamento de característica estática e ser usado, por exemplo, para defender teorias sobre uma significativa necessidade de aumento de tensão quando se utiliza correntes elevadas.

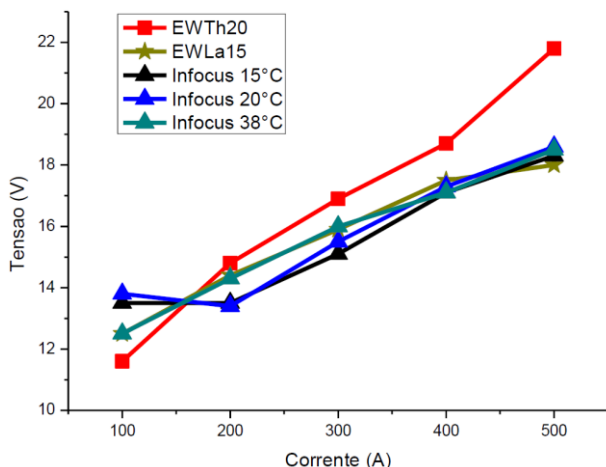


Figura 98 - Variação da tensão do arco para diferentes correntes utilizando diferentes tochas de soldagem e composição do eletrodo [2] (DEP 5 mm; Vs: 0,35 m/min; eletrodo de 6,4 mm de diâmetro afiado com 30°, ensaios realizados em aço carbono)

O problema na maioria das vezes ocorre quando os dados são apresentados, ou são replicados por outros autores, não é dada a devida atenção para as condições experimentais nas quais os mesmos foram

obtidos. Esse problema é potencializado pela própria estrutura utilizada tradicionalmente nos trabalhos acadêmicos, que impõe uma separação de materiais e métodos e discussão dos resultados. Dessa forma, muitas vezes os autores não apresentam junto aos resultados informações importantes como por exemplo, o material do ânodo utilizado ou qual foi a velocidade de soldagem usada no ensaio.

Os ensaios que deram origem aos dados apresentados na Figura 98 foram conduzidos em chapas de aço carbono com 0,35 m/min de velocidade de soldagem. O trabalho de Olivares [2] mostra que na faixa de velocidade que esses ensaios foram realizados, o uso de 500 A já possibilita a formação de uma soldagem com penetração total (técnica *keyhole*) em uma chapa de 6,4 mm de espessura. Isso significa que para os dados em questão, a superfície do ânodo variou totalmente de morfologia (principalmente pela ação da pressão do arco agindo na poça de fusão) e resultou em “DEP” efetivas extremamente diferentes à medida que a corrente de soldagem foi aumentada nesse levantamento. Dessa forma, considerando os dados da Figura 98 é muito provável que a maior parte da variação do valor de tensão obtida seja oriunda da citada modificação da morfologia do ânodo (aumento da DEP efetiva) do que de qualquer outro efeito, como aquecimento do eletrodo ou constricção do arco, por exemplo.

Dessa forma, é necessário realizar uma análise criteriosa dos dados de característica estática do processo TIG que estão disponíveis na literatura, pois na maioria das vezes não são citados alguns detalhes operacionais que influenciam diretamente nos resultados.

6.2 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS REALIZADOS

Para realização dos ensaios para obter a característica estática foi utilizado um bloco de cobre com dimensões 120 x 120 x 36 mm refrigerado com água. O mesmo não teve a superfície fundida durante os ensaios, tirando do experimento a influência da modificação das características do ânodo durante o ensaio. A unidade de refrigeração foi regulada para manter a água em 20°C, mas devido ao tempo de resposta do equipamento a temperatura da água variou no intervalo 16-21°C. Grande atenção foi dispensada ao aparato experimental para garantir que os ensaios fossem realizados nas condições adequadas, incorporando o mínimo de erro possível nos resultados.

Para que houvesse adequada manutenção da DEP durante os ensaios, foi utilizado o robô *Motoman IA10* para segurar a tocha de soldagem, enquanto o bloco de cobre foi fixado no posicionador *Motopos*,

que é um equipamento de movimentação com dois graus de liberdade controlado pelo próprio robô. Esse posicionador foi utilizado para variar a posição da chapa de cobre em baixo da tocha de soldagem com movimentos de oscilação com amplitude de 20 mm e velocidade de 10 cm/min, enquanto a tocha permaneceu parada. Esse movimento relativo entre a tocha e o ânodo foi realizado para permitir uma melhor distribuição de calor, e prevenir eventual fusão do cobre. Acredita-se que a movimentação lenta na tocha não influenciou de maneira significativa, ou produziu diferentes resultados nos valores de tensão, em comparação com o que seria obtido caso os ensaios fossem realizados com a tocha parada.

A abertura do arco foi realizada sempre por alta frequência (pulsos de alta tensão em curto espaço de tempo) para evitar os problemas que poderiam atrapalhar o ensaio caso a abertura fosse realizada por toque do eletrodo na peça (*lift-arc*), ou fosse usando um eletrodo adicional para iniciar a soldagem. As correntes utilizadas estavam no intervalo de 50-450 A, realizando uma medição a cada 50 A. A sequência de ensaios foi executada da menor para a maior corrente, usando cada eletrodo com afiação nova no início de cada sequência de medição.

As medições foram feitas utilizando o sistema SAP v.4.0 [43] da empresa IMC – Engenharia de Soldagem Ltda, e os cabos de medição de tensão foram conectados diretamente no corpo de cobre da tocha de soldagem, e foram parafusados no próprio bloco de cobre para praticamente eliminar a influência da resistência e do aumento de resistividade dos cabos nas diferentes correntes. A DEP foi mantida em 3 mm e o gás utilizado foi argônio puro (padrão de pureza utilizado normalmente para soldagem). Foi usada uma tocha padrão comercial modelo TIG 27B fabricada pela empresa Binzel, refrigerada a água, que tem capacidade nominal de 500 A. Os eletrodos usados foram os dopados com óxidos mistos de terras raras (ponta rosa denominado Lymox®) de 4,8 mm de diâmetro, com 3 afiações diferentes: ângulo de 20° e tronco de cone com diâmetro de 1 e 2 mm; e eletrodo pontiagudo com ângulo de afiação de 30°. A Figura 99 mostra uma imagem dos eletrodos utilizados. Para fins de comparação, foi realizada a medição nas mesmas condições supracitadas utilizando um eletrodo EWTh-2 de mesmo diâmetro e afiação pontiaguda com ângulo de 30°.

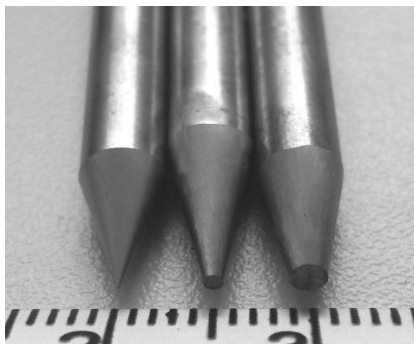


Figura 99 - Afição dos eletrodos utilizados no ensaio de medição da característica estática do processo TIG

Considerando as afirmações debatidas nos parágrafos anteriores, principalmente com relação à influência do aquecimento do eletrodo na queda de tensão observada, os ensaios do presente trabalho foram executados realizando-se a aquisição de um tempo de 40 s após a abertura do arco para cada corrente em cada condição. Esse tempo foi escolhido, pois foi considerado suficiente para permitir o estabelecimento do arco em regime com estabilização da temperatura do eletrodo, mas não muito longo a ponto de que outros fenômenos, como difusão e migração de óxidos pela superfície do eletrodo viessem a alterar os resultados. Com esses ensaios, foi plotado um gráfico calculando a média dos valores de tensão sempre no intervalo entre 35-40 s após a abertura do arco.

Para efeito de comparação, além do gráfico plotado com os resultados usando a metodologia de análise no intervalo de tempo conforme citado no parágrafo anterior, também foi plotado um gráfico os valores de tensão obtidos nos primeiros instantes após a abertura do arco (onde o eletrodo estava frio). Considerando que os primeiros milissegundos após a abertura do arco são de certa instabilidade e grande variação da tensão na abertura, os valores de tensão até 0,5 s após a abertura do arco foram descartados. Então cada ponto apresentado neste gráfico adicional representa a média dos valores de tensão calculados usando sempre o intervalo de tempo entre 0,5-1 s após o momento da abertura do arco.

6.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os gráficos com os resultados dos ensaios estão mostrados na sequência do texto. Os valores de tensão obtidos em cada eletrodo nos

primeiros instantes após a abertura do arco (tempo entre 0,5-1,0 s após a abertura do arco) estão mostrados na Figura 100.

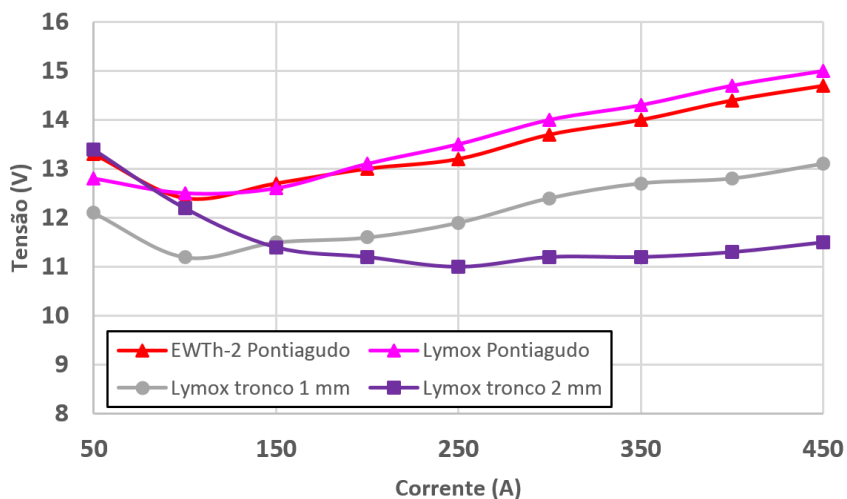


Figura 100 – Valores da tensão do arco para diferentes correntes no processo TIG com eletrodos usando diferentes afiações logo após a abertura do arco. (DEP 3 mm, gás argônio)

Os dados que visam descrever o comportamento da tensão em um período de tempo onde acredita-se que o eletrodo já adquiriu estabilidade térmica estão apresentados na Figura 101. Como já citado anteriormente, esses dados foram obtidos calculando a média dos valores de tensão sempre no intervalo entre 35-40 s após a abertura do arco.

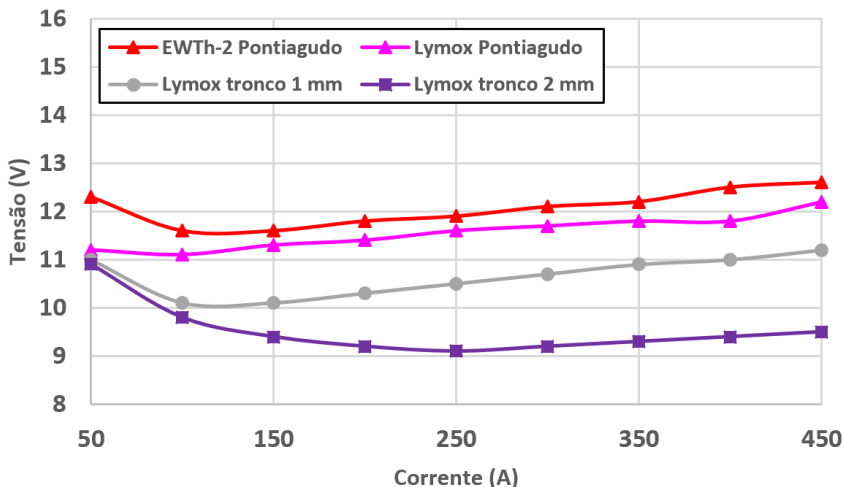


Figura 101 - Característica estática do processo TIG com eletrodos usando diferentes afiações 35 s após a abertura do arco. (DEP 3 mm, gás argônio)

Analisando os resultados dos dois gráficos, é possível notar que os valores de tensão foram cerca de 1-2 V menores para a média calculada no intervalo 35 s após a abertura do arco em comparação com os valores calculados imediatamente após a abertura do arco. Isso está de acordo com o que havia sido discutido nos parágrafos anteriores, corroborando a tendência de diminuição da tensão conforme o eletrodo adquire maior temperatura. Além disso, o eletrodo que apresentou maior diferença foi justamente o que tinha ponta de tronco de cone com 2 mm de diâmetro (o qual teria teoricamente maior dificuldade de aquecimento da ponta).

Foi possível observar também que os valores de tensão para toda a faixa de corrente foram maiores para os eletrodos pontiados. Uma hipótese para explicar esses maiores valores seria a DEP efetiva em cada condição. Apesar do uso de 3 mm para a DEP em todos os casos, não é difícil admitir que quanto maior for diâmetro do tronco de cone, maior é a superfície do eletrodo disponível para emissão já na distância de 3 mm. No caso do eletrodo pontiado, apesar da ponta estar posicionada a 3 mm, boa parte da superfície de emissão no cone afiado, está posicionada 1 ou 2 mm acima da ponta do eletrodo. Dessa forma, o eletrodo pontiado tende naturalmente a ter uma maior distância efetiva entre a superfície de emissão do cátodo e o ânodo, sendo essa uma hipótese para explicar os maiores valores de tensão. Analisando a geometria das pontas dos eletrodos, seria possível afirmar que existiria uma tendência do eletrodo pontiado ter maior facilidade de aquecimento de sua ponta, reduzindo a

função trabalho e conseqüentemente a tensão necessária (ou conseguindo emitir a corrente em uma menor área), porém, os dados obtidos não mostraram indicações que pudessem sustentar essa hipótese em nenhuma das condições avaliadas.

Na comparação entre o eletrodo com óxidos mistos e com tória, os resultados dos gráficos nos momentos iniciais mostraram uma tendência de valor de tensão um pouco maior para o Lymox, porém, no gráfico que mostra os dados 35 s após a abertura, é possível notar uma clara tendência de menor tensão do arco para esse eletrodo em toda a faixa de medição. Apesar da diferença ser pequena (menos de meio volt), seria possível a partir desses resultados atribuir uma facilidade de emissão do eletrodo Lymox, provavelmente pela menor função trabalho dos óxidos usados em comparação com a tória. Isso possibilitaria ao eletrodo conseguir emitir a densidade de corrente em uma área menor, e, ou com uma menor temperatura necessária, resultando em um menor campo eletromagnético e menor tensão requerida para manutenção do arco.

Com base nos dados obtidos para o eletrodo com ponta em tronco de cone com 2 mm de diâmetro, é possível verificar que o ponto de menor tensão ocorreu na corrente de 250 A, enquanto que para as demais afiações, os menores valores foram encontrados para 100 A. Essa verificação é uma forte indicação que o aquecimento da região de emissão do eletrodo é o fator preponderante para explicar o formato em U obtido normalmente na característica estática do processo TIG, contrariando as afirmações de alguns autores (citadas no início dessa discussão) que o fator principal seria o aumento da temperatura do plasma devido ao aumento da corrente.

Da mesma forma, a justificativa de que o aumento dos valores de tensão em correntes maiores do que a corrente de transição é decorrente do aumento da energia desperdiçada devido ao aumento de colisões dos elétrons com íons também parece não ter fundamentação uma vez que nos ensaios do presente trabalho foi verificado que a tensão somente cerca de 1 V quando a corrente foi aumentada de 150 para 450 A. Isso pode indicar que os aumentos mais pronunciados apresentados por outros autores seja decorrente de alguma mudança na condição experimental (provavelmente devido à alteração da superfície do ânodo que causa um aumento da DEP efetiva à medida que a corrente é aumentada, ou aumento da resistividade dos cabos ou do eletrodo com o aumento da corrente).

Essa observação de que a tensão aumenta somente 1 V quando a corrente passa de 150 para 450 A, é muito interessante, pois, indica que o aumento da tensão para o processo TIG verificada à medida que a corrente é aumentada (como mostrado nos dados da Figura 98, por exemplo), pode ser resultado quase que totalmente devido à alteração da superfície do

ânodo (considerando logicamente a citada faixa de valores de corrente). De certa forma é até surpreendente que a diferença do valor de tensão necessária para manter o arco em 150 e 450 A seja somente 1 V, uma vez que a corrente foi 3 vezes maior. Considerando essa variação de tensão relativamente pequena que foi obtida, os resultados do presente trabalho corroboram a medição apresentada por Busz e Finkelburg [34], já que a variação foi semelhante. Deve ser levado em consideração que para outros diâmetros de eletrodo é possível que fatores como o aumento da resistividade do mesmo (devido à mudança de temperatura diferenciada para diferentes diâmetros de eletrodo) influenciem de forma mais significativa nos resultados (principalmente no caso dos eletrodos de menor diâmetro, por exemplo). Além disso, maiores DEP também poderiam induzir maior variação. Mesmo assim, acredita-se que a magnitude da variação produzida nesses casos ainda seria pouco significativa em relação à variação da tensão causada pela modificação da superfície do ânodo quando o mesmo é fundido.

7. ENSAIOS COM A TÉCNICA SCHLIEREN

Um ponto importante no projeto de tochas de soldagem é a eficiência da distribuição do gás de proteção. Essa questão adquire maior significância quando se imagina a utilização em elevada velocidade de soldagem. Durante a fase de projeto da 2ª versão da tocha de soldagem TIG-DE, essa questão foi considerada, e foi investido bastante atenção no projeto do sistema difusor de gás, resultando em uma peça com vários canais, e de usinagem relativamente complexa. Se esperava com isso obter um desempenho semelhante ao que se obtém nas tochas comerciais que utilizam *gas-lens*. Porém, com o primeiro modelo de bocal testado, que possuía 16 mm de comprimento e 22 mm de diâmetro de abertura, o desempenho da proteção não ficou tão boa quanto imaginado. Usando distância entre o bocal e a peça de cerca de 10 mm, a proteção foi considerada adequada. Mas conforme essa distância era aumentada, (usando 15 mm ou distâncias maiores), a proteção da poça começava a ser considerada insuficiente (apresentado alguns indícios de oxidação da poça considerados fora do normal). Quando foram fabricados bocais com 21 mm de comprimento os resultados foram melhores, e não foram notadas sinais de falta de proteção.

Considerando essa experiência de projetar, construir e testar tochas de soldagem, também seria importante se fosse possível avaliar o fluxo de gás utilizando algum método que pudesse fornecer maiores informações do que o próprio resultado da soldagem. Com esse objetivo, foram realizados ensaios utilizando a técnica *Schlieren* procurando visualizar o fluxo de gás, aproveitando também a disponibilidade no ISF de um aparato experimental já montado para esse fim.

7.1 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

Apesar da disponibilidade do aparato para realização de ensaios com a técnica *Schlieren* (constituído de guias de alinhamento, espelho, lentes), já havia passado muitos anos desde a última vez que o mesmo havia sido utilizado, e não haviam pessoas da equipe com grande experiência ou *know-how* em realizar filmagens ou configurar o aparato para usar essa técnica, então o trabalho teve que ser iniciado praticamente do zero.

A Figura 102 mostra um desenho esquemático do aparato utilizado, explicando o funcionamento da técnica, que tem como princípio físico a mudança de velocidade de propagação da onda (luz) em diferentes meios, que acaba causando desvio na direção original da onda. Ao atravessar um meio com diferente índice de refração (como um gás diferente, por

exemplo), um feixe de luz tende a ser desviado. O desvio será maior conforme maior for a diferença do índice de refração de cada gás. Na técnica *Schlieren*, é utilizado um arranjo óptico para projetar um feixe de luz paralelo no volume que se deseja observar (nesse caso a saída de gás da tocha de soldagem). Depois de atravessar o fluxo de gás da tocha, o feixe de luz é focalizado utilizando um espelho côncavo. Ao posicionar uma lâmina (ou uma chapa com um pequeno orifício central) no ponto focal é possível impedir a passagem da parte do feixe de luz que foi desviado, e com isso é formada uma imagem que apresenta regiões mais escuras onde houve a maior refração.

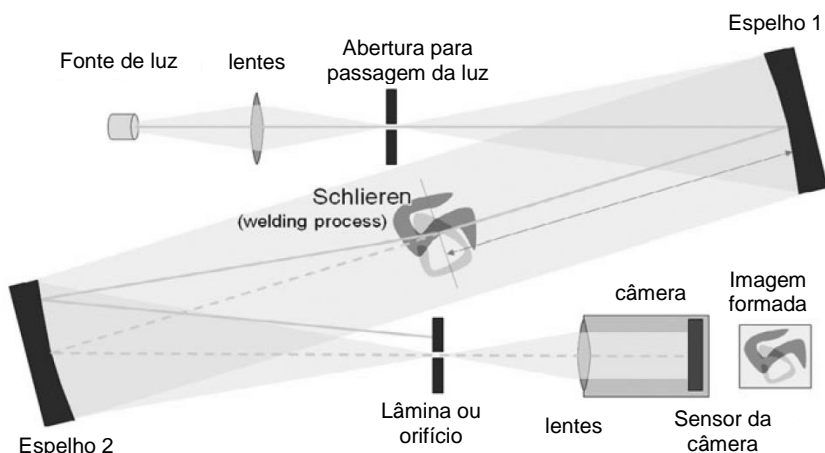


Figura 102 – Desenho esquemático mostrando a configuração conhecida como Sistema Toepler Modificado (configuração em Z), que foi utilizado para filmagens com a técnica Schlieren. Figura adaptada de [44]

A Figura 103 mostra imagens do aparato utilizado em configuração em “Z”, com a descrição dos componentes principais.

1- Fonte de luz xênon 300 W modelo *Eurosep Spotlight 5000* transmitida com fibra.

2- Acoplamento da fibra que transmitia a luz e conjunto de lentes para focalizar o feixe.

3- Primeiro espelho côncavo.

4- Segundo espelho côncavo.

5- Ponto onde o feixe de luz fazia foco e a lâmina estava posicionada.

6- Câmera de alta velocidade.

7- PC utilizado para aquisição das imagens.

8- Tocha de soldagem TIG-DE.

9- Chapa de cobre refrigerada por água utilizada como ânodo para os testes com o arco estabelecido.

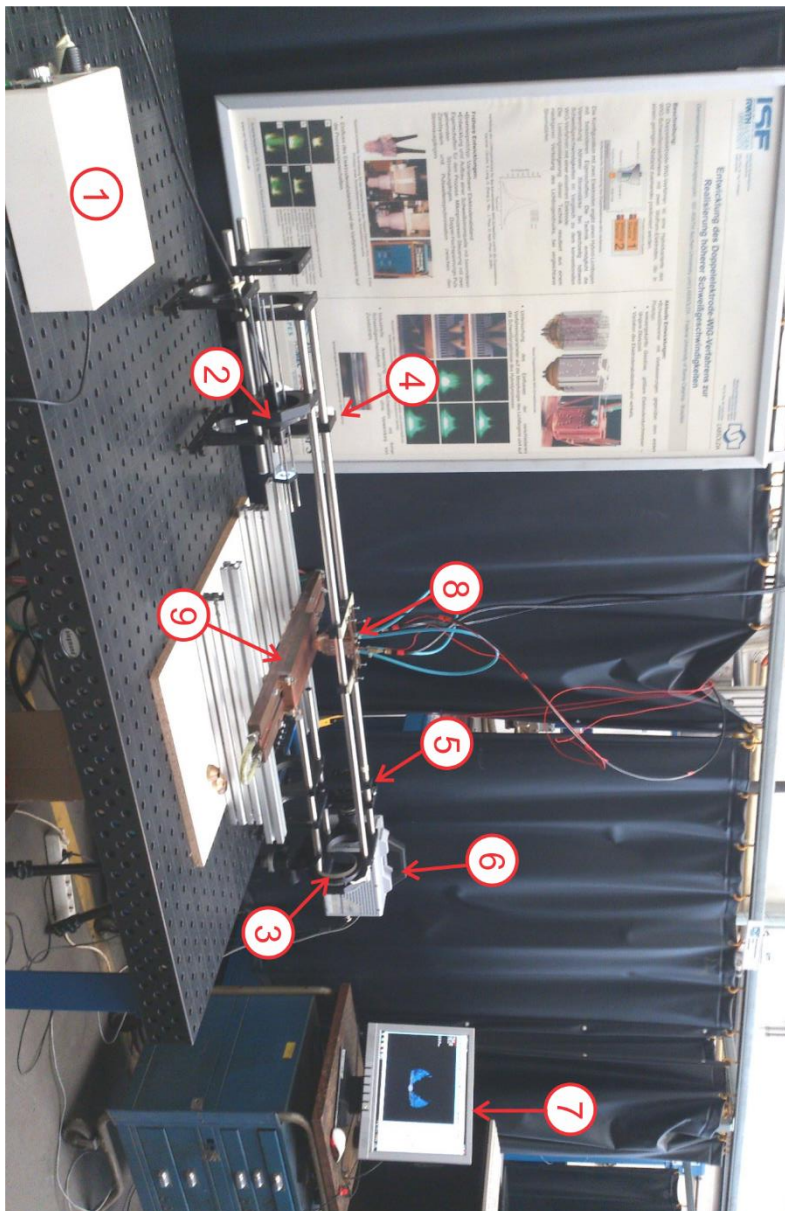


Figura 103 - Aparato experimental para visualização do fluxo de gás na tocha de soldagem TIG-DE utilizando a técnica *Schlieren*

A Figura 104 mostra os diferentes bocais que foram utilizados nas comparações de visualização do fluxo de gás, com as seguintes dimensões: Bocais (1) e (2) com 22 mm de diâmetro de abertura e 21 mm de comprimento (mas com ângulo de saída de gás diferente), bocal (3) 17 mm de diâmetro de abertura e 21 mm de comprimento, e bocal (4) 22 mm de diâmetro de abertura e 16 mm de comprimento.

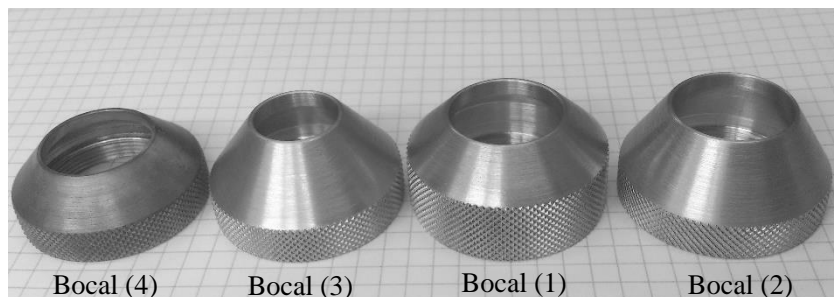


Figura 104 - Bocais com diferentes geometrias para a tocha TIG-DE

7.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente a expectativa era de no mínimo conseguir visualizar o fluxo de gás de forma semelhante às imagens usadas em propagandas de equipamentos comparando um bocal TIG com e sem *gás lens*, como no exemplo mostrado na Figura 105. Não se sabe exatamente a metodologia utilizada para obtenção destas imagens (se é usado fumaça, gelo seco, ou algum gás especial).

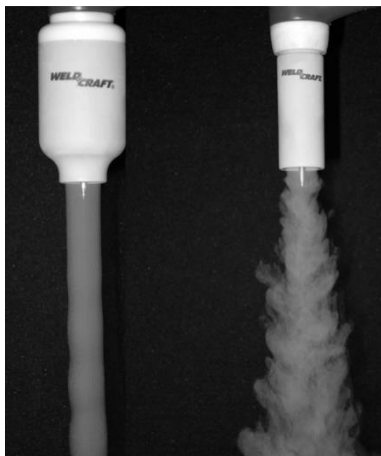


Figura 105 - Exemplo de comparação mostrando o que seria o fluxo de gás em uma tocha TIG com e sem gás lens [45]

Apesar da teoria por trás do experimento ser aparentemente simples, e ser possível encontrar várias imagens e vídeos de filmagens da técnica em diversas aplicações não relacionadas à soldagem, de maneira geral os resultados obtidos do fluxo do gás saindo do bocal da tocha de soldagem não atenderam à expectativa inicial. Mesmo após várias tentativas não foi possível captar boas imagens utilizando argônio como gás de proteção. Até era possível ver algumas linhas do fluxo de gás, mas as mesmas eram tão sutis que não traziam possibilidade alguma de análise ou adequado registro pela câmera. Não se sabe se de fato existia algum problema na montagem do experimento, como por exemplo, o uso não adequado de algum dos componentes (espelhos, a fonte de luz, lentes, etc). Um dos pontos que dificultaram a obtenção de melhores resultados foi que a lente da câmera de alta velocidade que proporcionava um zoom adequado tinha uma distância focal muito pequena para realizar as filmagens nesse experimento. Dessa forma, foi utilizado uma lente com menor distância focal, mas que no final deixava a imagem final com menor resolução. Apesar de não ser possível a visualização do fluxo de argônio, era possível visualizar de forma muito clara as linhas de fluxo de um gás butano, ou de um gás aquecido (como uma vela ou um fósforo aceso).

Após realizar uma pesquisa um pouco mais aprofundada sobre o tema, foram encontradas de fato poucas publicações mostrando resultados da técnica aplicada para soldagem. Além disso, não foi encontrada nenhuma publicação que mostrasse resultados utilizando a técnica

Schlieren que fosse possível visualizar de maneira clara o fluxo de argônio em uma tocha de soldagem sem o arco estabelecido.

O único trabalho nacional encontrado que aplica a técnica *Schlieren* em soldagem foi de Resende e Vilarinho [46], onde as imagens foram feitas com o arco ligado, porém, as imagens mostradas são de resolução muito baixa. As melhores imagens de fluxo de gás em soldagem TIG foram encontradas nos trabalhos da TU Dresden [44, 47], que estão mostradas na Figura 106. Todas as imagens desses trabalhos foram também feitas com o arco estabelecido, e os autores utilizaram um arco TIG adicional como fonte de iluminação. Nessa comparação, é possível tirar algumas conclusões qualitativas sobre qual vazão é melhor, mas mesmo assim o nível de detalhamento obtido não permite análises muito complexas. Além disso, as regiões mais visíveis do fluxo são próximas às regiões de maior temperatura (o arco), e não é possível visualizar linhas para o restante do fluxo de gás.

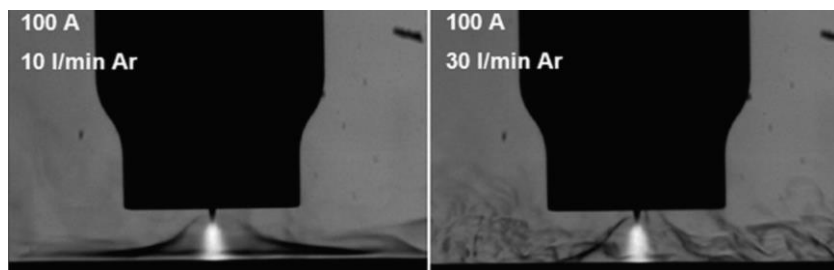


Figura 106 - Imagem do fluxo de gás utilizando a técnica *Schlieren* obtida por pesquisadores da TU Dresden comparando diferentes vazões de gás de proteção no processo TIG. [47]

A dificuldade de visualizar o fluxo de argônio pode ser explicada usando as informações contidas no trabalho de Resende e Vilarinho [46], que cita que: a sensibilidade do método *Schlieren* está relacionada com a capacidade de permitir a visualização de uma mínima variação de densidade do meio em análise; e que o maior ângulo de desvio ocorre na periferia do escoamento, e é dado aproximadamente por:

$$\varepsilon_{m\acute{a}x} = 2 \cdot \left(\frac{n}{n_0} - 1 \right) \quad (\text{Equação 1})$$

Onde n é o índice de refração do escoamento, e n_0 o índice de refração fora do escoamento. O valor numérico de $\varepsilon_{m\acute{a}x}$ dado pela Equação (1) é em radianos, mas como seu valor é muito pequeno, por conveniência, será convertido para arcsegundos, multiplicando por 206.265. De acordo

com Settles *apud* [46], uma variação de 2% na densidade dentro e fora do escoamento causa um desvio de aproximadamente 2.4 arcsegundos. Este é o valor mínimo para que a técnica Schlieren consiga revelar a variação de densidade. Segundo os dados de [48] o índice de refração (considerando a pressão de 101.325 Pa e temperatura de 0 °C) do ar é 1,000292, e o do argônio é 1,000281. É possível de observar que o índice de refração desses dois gases é muito próximo, resultando um desvio máximo de somente 4,5 arcsegundos de acordo com a Equação 1. Dessa forma se justifica a grande dificuldade em se obter uma boa resolução do experimento utilizando argônio sem realizar a abertura do arco. Quando o arco está estabelecido, logicamente o gás é aquecido nas regiões próximas ao arco, causando mudança do índice de refração, e facilitando assim a visualização de algumas indicações e linhas do fluxo de gás de proteção.

Ainda na tentativa de filmar o fluxo de gás na tocha TIG-DE desenvolvida sem necessidade do arco estar estabelecido, foram realizados ensaios utilizando um fluxo de CO₂ no gás de proteção. O índice de refração desse gás é 1,000449 [48], resultando em um desvio máximo de 16,2 arcsegundos usando a Equação 1. Esse valor é quase quatro vezes maior do que o obtido com argônio, facilitando assim a visualização do fluxo. A utilização de CO₂ possibilitou a obtenção das imagens do fluxo saindo pelos diferentes bocais.

A comparação entre os quatro bocais usando CO₂ no gás de proteção está mostrado na Figura 107. Na sequência de imagens é possível notar que o fluxo se apresenta bastante turbulento. Logicamente não se pode esperar que o escoamento do CO₂ seja totalmente adequado para representar o fluxo de argônio saindo dos bocais, devido às diferenças de viscosidade e densidade dos gases. Dessa forma, não é possível tecer muitas conclusões sobre o desempenho dos diferentes bocais, principalmente com relação ao fluxo ser ou não turbulento em diferentes vazões. Apesar disso, é possível verificar uma tendência do bocal 3 (o que possui o menor diâmetro de abertura) de produzir um fluxo de gás que manteve a direção sem dispersar por uma maior distância. Além disso, ficou bastante clara a tendência do bocal 4 (que possui o menor comprimento) apresentar uma distribuição de gás tendendo sempre para a esquerda do vídeo. Essa distribuição desigual foi atribuída ao comprimento insuficiente do mesmo para direcionar o fluxo para baixo.

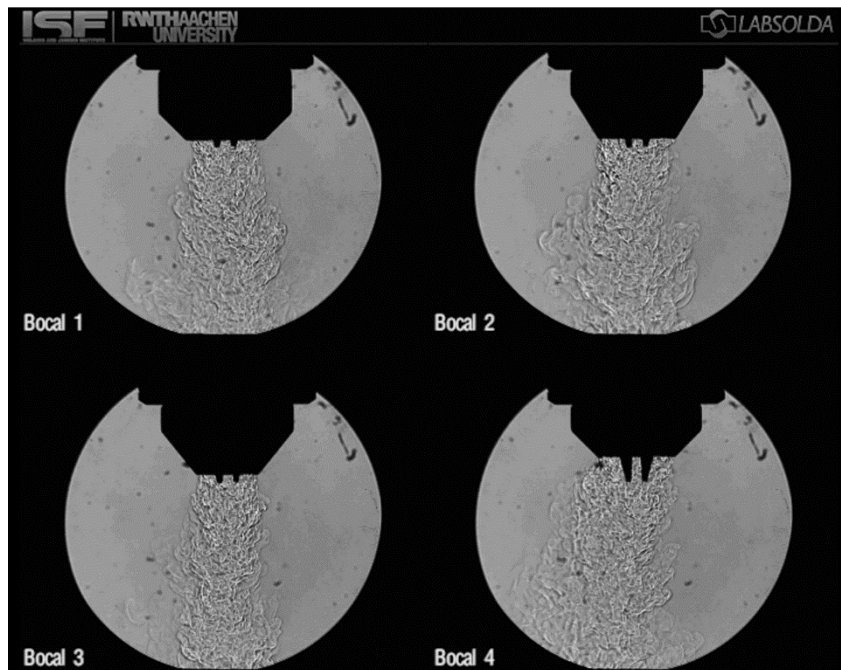


Figura 107 – Imagens obtidas com a técnica Schlieren comparando o fluxo de gás com os diferentes bocais. Gás utilizado CO_2 . Vazão utilizada 10 l/min

Para conseguir visualizar o fluxo com argônio puro, foram então realizadas filmagens com o arco estabelecido. Dessa forma, com o gás aquecido era possível visualizar algumas linhas do fluxo de gás, porém, como já era esperado, a imagem na região próxima ao arco ficou saturada. A Figura 108 mostra um exemplo das imagens obtidas. Também foram realizadas filmagens colocando um anteparo na frente do arco, como na imagem mostrada na Figura 109, porém o resultado também não foi satisfatório, uma vez que a imagem obtida não fornece informação suficiente para tirar conclusões. Foram realizadas filmagens também usando uma tocha TIG convencional padrão comercial com *gas-lens*, sendo que o objetivo era tentar obter uma informação comparativa com a tocha TIG-DE, e verificar se seria possível tirar alguma conclusão se o fluxo era laminar.

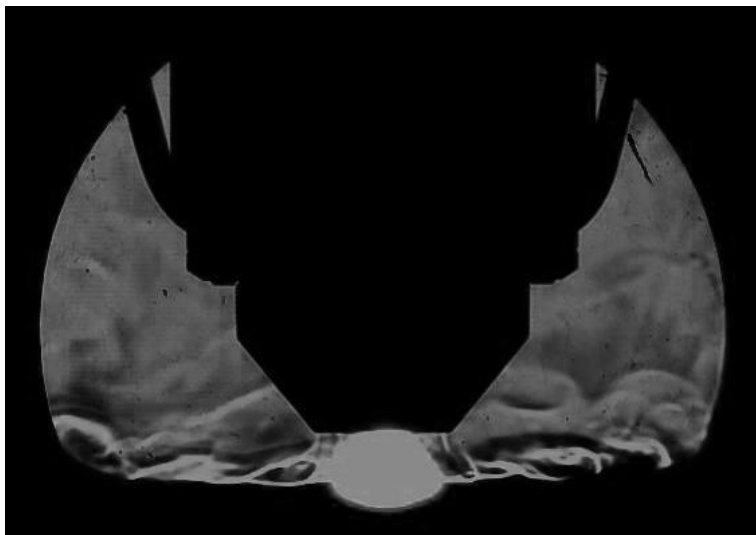
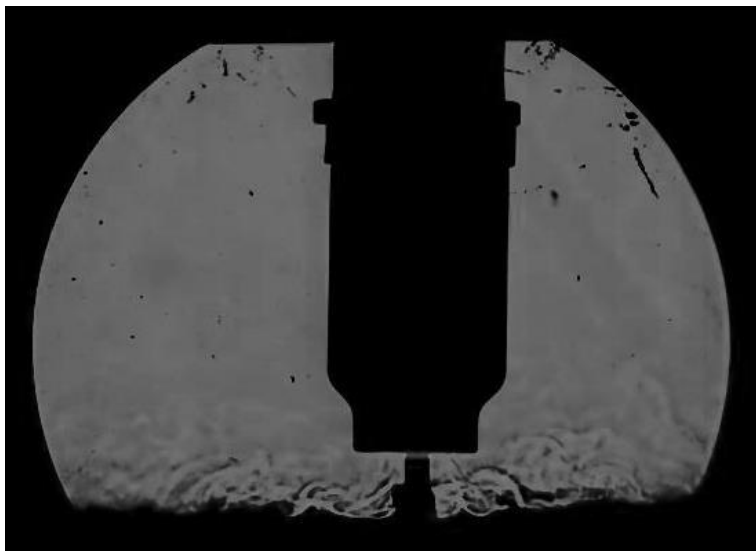


Figura 108 - Imagem do fluxo de gás na tocha TIG-DE obtida pela técnica *Schlieren* filmando também diretamente o arco. Gás utilizado: Argônio 20 l/min



Figura 109 - Imagem do fluxo de gás na tocha TIG-DE obtida pela técnica *Schlieren* utilizando um anteparo na frente do arco. Gás utilizado: Argônio 20 l/min



**Figura 110 - Imagem do fluxo de gás obtida usando a técnica Schlieren em uma tocha TIG convencional usando gás lens. Imagem obtida usando um anteparo em frente ao arco.
Gás: Ar puro com 10 l/min**

Do ponto de vista prático, a conclusão foi que a técnica *Schlieren* se apresentou de pouca ajuda para avaliar os diferentes modelos de bocais da tocha, uma vez que não foi possível visualizar o fluxo de argônio sem utilização do arco para aquecer o gás. Não resta dúvida que os equipamentos e a montagem do aparato usado poderiam ser melhores, uma vez que o nível de detalhamento das imagens obtidas no presente trabalho ficou muito aquém do que foi observado nos trabalhos [44, 47] (imagens da Figura 106). Além disso, não foi montado um *set-up* para filmagem do arco como foi feito nesses trabalhos. Mas de maneira geral a experiência de tentar utilizar a técnica foi considerada muito boa, pois não são encontrados trabalhos realizando uma análise crítica discutindo a real capacidade, e quais devem ser os resultados esperados. Outro ponto interessante foi a experiência de utilizar CO_2 como gás de teste. Isso abre possibilidade para realizar estudos com esse gás para avaliar até que ponto é possível se utilizar de filmagens realizadas com o CO_2 (e outros gases). Mesmo que a tocha seja projetada para argônio, se for possível estabelecer uma relação que o comportamento apresentado com o escoamento de CO_2 também é válido para o argônio, a técnica poderia ser bastante útil para avaliar o fluxo de gás nas novas tochas projetadas e construídas.

8. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta importante contribuição na área da tecnologia dos processos de soldagem pelo desenvolvimento de um primeiro sistema de soldagem TIG Duplo Eletrodo nacional com capacidade de operação em corrente total de até 900 A. Versões da tocha TIG-DE e da fonte de soldagem desenvolvidas estarão disponíveis para comercialização de maneira quase imediata, por meio das empresas parceiras que apoiaram o trabalho. Dessa forma, a tecnologia estará disponível com custos acessíveis para o mercado nacional. Certamente, o equipamento desenvolvido servirá para outros estudos no próprio LABSOLDA-UFSC e em outras instituições de pesquisa, e também poderá ser utilizado em aplicações industriais. Ao longo do trabalho foi verificado que internacionalmente, o novo processo tem possibilitado aumento de produtividade em diferentes tipos de aplicações, como a soldagem de união de chapas de variadas espessuras (entre 3-50 mm) usando ou não a alimentação de metal de adição. Além disso, o processo desenvolvido tem sido apontado como uma alternativa para aumento de produtividade em operações de revestimento, que são fundamentais para indústria de petróleo e gás. Por conta desse grande leque de aplicações, é evidente que a implantação do processo desenvolvido poderá trazer importante retorno para a indústria brasileira.

Com relação aos diferentes aspectos analisados, é possível elencar as seguintes conclusões:

Com relação aos equipamentos desenvolvidos:

- A fonte de soldagem desenvolvida possibilitou o estudo do processo de maneira adequada, permitindo executar a pulsação da corrente com regulagem de sincronização entre as duas saídas de corrente. O sistema de abertura do arco usando pulsos de alta frequência funcionou de maneira eficiente, e possibilitou obter a operacionalidade requerida para viabilizar a pesquisa e aplicação do processo TIG duplo eletrodo.

- A tocha de soldagem desenvolvida possibilitou o estudo do processo TIG-DE com diferentes posicionamentos relativos entre os eletrodos, e também resistiu a centenas de ensaios usando corrente superior a 300 A em cada eletrodo. Com esse equipamento, foi possível o estudo do processo na faixa de corrente desejada, e também o desenvolvimento de procedimentos de soldagem de alta velocidade.

Com relação ao estudo do comportamento do arco:

- Foi possível verificar que o posicionamento relativo entre os eletrodos foi o principal parâmetro que influencia na morfologia do arco obtida. Esse parâmetro influencia no desvio do arco na região central entre os dois eletrodos da seguinte forma:

- Para elevadas distâncias (maiores que 20 mm), o desvio é praticamente insignificante. Conforme essa distância é diminuída, o desvio tende a aumentar de intensidade (usando cerca de 6 mm de afastamento, por exemplo, é possível notar que uma porção significativa do plasma é desviada em direção contrária à peça). Porém, quando o afastamento entre os eletrodos é diminuído para valores bem pequenos, como 2 mm ou menos, a configuração geométrica é tal que o desvio não ocorre, e é possível utilizar corrente elevada sem os efeitos negativos do desvio do plasma.

- O desvio do arco formado no processo TIG-DE tende a apresentar efeitos negativos, como aquecimento excessivo e contaminação dos eletrodos, aquecimento e degradação da tocha de soldagem. Além disso, foram encontrados indícios que o desvio do arco tende a diminuir a eficiência de fusão do processo.

- Foi possível mostrar que a técnica do pulsado sincronizado fora de fase permite diminuir o desvio do arco em qualquer afastamento entre os eletrodos, permitindo a operação do processo em diferentes configurações sem que ocorram os efeitos indesejados do desvio do arco.

- Foi possível verificar que o comportamento do arco é consideravelmente diferente conforme a velocidade de soldagem é modificada:

- Para condições estáticas (ou de pequenas velocidade de soldagem), o desvio do arco ocorre de maneira simétrica entre os dois eletrodos, e a queda de tensão em cada eletrodo apresenta valores iguais.

- Para as condições de velocidades de soldagem maiores (a partir de 0,6 m/min), a região de maior luminosidade do arco tende a ficar mais próxima ao eletrodo que está atrás (considerando o sentido da soldagem). Esse efeito é maior conforme a velocidade é aumentada, e os valores de queda de tensão de cada eletrodo também acompanham as modificações de morfologia do arco. As menores quedas de tensão são observadas no eletrodo que a região mais luminosa do arco está mais próxima.

Com relação aos ensaios de medição da pressão de estagnação do arco realizados com 70 A em cada eletrodo para o TIG-DE:

- As medições mostraram que ao aumentar a distância entre os eletrodos ocorre a diminuição dos valores máximos medidos, corroborando os resultados de outros pesquisadores.

- Foi possível também verificar que mesmo usando o menor afastamento possível entre os dois eletrodos (0,5 mm), o valor máximo de pressão medido foi cerca da metade do valor obtido com o processo TIG usando eletrodo único e o dobro da corrente (140 A) e foi aproximadamente o dobro do valor obtido com o processo TIG usando eletrodo único com 70 A. Esses resultados corroboram os resultados de outros pesquisadores caracterizando a menor pressão de arco proporcionada pelo TIG-DE em comparação com o TIG convencional para a mesma corrente média total.

- A menor pressão do arco obtida no processo TIG-DE em comparação com o TIG convencional, considerando a mesma corrente média total, é causada principalmente pelo fato de que a pressão do arco no processo TIG aumenta de forma muito mais pronunciada do que o linear, quando a corrente de soldagem é linearmente aumentada (pelo menos para a faixa de corrente abaixo de 200 A, faixa onde existe maior disponibilidade de dados de medições para possibilitar análise e conclusões). Dessa forma, sempre quando a comparação for feita considerando o mesmo valor de corrente total, e a corrente for dividida em dois eletrodos no TIG-DE, a soma da pressão dos arcos tende a ser menor que a pressão do processo TIG convencional usando o dobro da corrente. Além disso, a interação magnética dos dois arcos tende a desviar o jato de plasma (inclusive em direção contrária à peça), resultando em uma diminuição ainda mais pronunciada nos valores de pressão do arco obtidos.

Com relação aos ensaios de medição da pressão de estagnação do arco realizados com o processo TIG convencional:

- As medições realizadas usando 140 A mostraram que o valor máximo da pressão diminuiu significativamente com o uso da afiação tipo tronco de cone. Usando ponta com 1 e 2 mm de diâmetro, os valores máximos medidos foram respectivamente 0,44 e 0,22 do valor obtido usando eletrodo com afiação pontiaguda. A menor pressão do arco obtida com os eletrodos usando afiação em tronco de cone foi verificada também na menor tendência de formação de *humping* observada em ensaios tipo cordão sobre chapa usando 300 A.

- As medições realizadas com 70, 100 e 140 A utilizando a mistura contendo 5% de H₂ ao argônio mostraram para todos os casos a pressão foi um pouco menor do que o obtido com Ar puro, sendo que os valores foram cerca de 0,75-0,9 do valor máximo obtidos com argônio puro.

Com relação aos ensaios tipo cordão sobre chapa:

- Foi possível verificar que o processo TIG-DE permite utilizar um valor total de corrente de soldagem muito maior do que o TIG convencional sem o aparecimento de *humping*. Além disso, (considerando ensaios realizados usando 300 A em cada eletrodo) foram verificados indícios de um comportamento atípico em comparação ao que é mostrado na literatura sobre a formação de *humping* com o processo TIG convencional, pois no caso do TIG-DE se obtiveram cordões contínuos com as velocidades de soldagem mais elevadas.

- Nas condições testadas, o aparecimento de *humping* foi mais pronunciado conforme o afastamento entre as pontas dos eletrodos era diminuído. Esse resultado está de acordo com a tendência esperada de maior surgimento de *humping* para a condição que proporciona a maior pressão do arco.

- De maneira geral, foi possível notar uma menor rigidez do arco usando o TIG-DE em comparação com o processo TIG convencional usando a mesma corrente média total, deixando o processo mais sensível à desvios do arco.

Com relação ao desenvolvimento de procedimentos de soldagem de chapas de aço em junta sobreposta:

- O processo TIG-DE possibilitou aumento de 50% na velocidade de soldagem em comparação com o TIG convencional. Apesar disso, o aspecto da superfície do cordão apresentou menor uniformidade em relação ao que é obtido usando o processo com eletrodo único.

- O processo TIG-DE, nas condições utilizadas de soldagem de chapas de aço em junta sobreposta apresentou menor repetitividade do que o processo convencional, fato atribuído à menor rigidez do arco para o processo com dois eletrodos.

Com relação aos ensaios realizados em ânodo de cobre para verificar a característica estática do TIG convencional com afiação do eletrodo em tronco de cone:

- Foi possível verificar que a tensão necessária para estabelecer o arco no processo TIG usando argônio sofre variação muito pequena para as diferentes correntes, sendo que foi encontrada variação de somente 1 V na faixa entre 150-450 A. Dessa forma, a grande variação dos valores de tensão que é observada tipicamente nos dados da literatura foi atribuída às variações do ânodo ou fatores externos.

- Para os eletrodos com a afiação em tronco de cone, foi possível mostrar que o aumento do diâmetro da ponta faz com que a corrente onde

a tensão do arco apresenta o menor valor na curva de característica estática seja aumentada, sendo que para o diâmetro de 2 mm essa corrente foi 250 A.

Com relação à experiência usando a técnica *Schlieren* para visualizar o fluxo de gás de proteção no bocal da tocha:

- Foi notada grande dificuldade em visualizar o fluxo de argônio saindo da tocha usando a técnica *Schlieren*. A experiência dos ensaios realizados em conjunto com a análise das publicações encontradas, permite concluir que apesar de ser teoricamente possível, na prática é difícil a obtenção de boas imagens de um fluxo de argônio saindo de uma tocha de soldagem sem que o gás seja aquecido de alguma forma. Essa dificuldade foi atribuída à pequena diferença de índice de refração do argônio em relação ao ar quando os dois fluidos estão na mesma temperatura.

- É possível obter imagens do fluxo de argônio quando aquecido pelo arco, porém as linhas de fluxo irão aparecer somente em pontos onde o índice de refração é modificado com maior intensidade (como nas regiões mais próximas ao arco).

- É possível obter imagens do fluxo de CO₂ saindo do bocal da tocha com bastante facilidade, fato atribuído à maior diferença de índice de refração deste gás em comparação ao ar.

9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

É comum chegar ao final de um trabalho acadêmico e constatar que apesar do que foi realizado, surgiram novas questões que ficaram sem serem respondidas. Principalmente considerando que o arco, ferramenta aplicada nos processos de soldagem, incorpora fenômenos extremamente complexos. Uma compreensão mais plenamente aprofundada dos diferentes fenômenos físicos em um arco de soldagem e suas interações com a poça de fusão é um desafio reservado a poucas mentes privilegiadas mundo afora. Para a maioria dos pesquisadores (incluindo o autor do presente trabalho), cujos cunhos de trabalho são mais aplicativos, é necessário uma grande carga de trabalho experimental para que algumas explicações possam ser propostas. Dessa forma, é esperado que muitas respostas não consigam ser dadas dentro do âmbito de determinado trabalho, e tenham que ser investigadas em trabalhos futuros. Para o caso do processo TIG Duplo Eletrodo, por se tratar de um processo novo mesmo internacionalmente, o número de tópicos que devem ser objeto de estudo é muito maior. Alguns desses tópicos foram aqui elencados como sugestões para trabalhos futuros:

- Desenvolvimento de tocha TIG-DE com menores dimensões, as quais permitam melhor acesso à junta e também operação com menores ângulos de ataque em relação à peça.

- Estudo do processo TIG-DE com posicionamento relativo entre os eletrodos e também afiação dos eletrodos diferentes aos realizados no presente trabalho.

- Estudo e desenvolvimento do processo TIG-DE com alimentação de arame quente visando aplicações de revestimento de alta produtividade.

- Estudo e desenvolvimento do processo TIG-DE para soldagem em outros tipos de junta diferentes da junta sobreposta.

- Estudo do processo TIG-DE com posicionamento dos eletrodos em relação à junta de maneira diferente do posicionamento em “tandem” adotado no presente trabalho.

- Desenvolvimento e estudo de tochas TIG-DE com eletrodo usando refrigeração direta do eletrodo. Além de possibilitar diferentes características do arco, isso aumentaria a viabilidade do estudo e/ou aplicação do processo com polaridade diferente em cada eletrodo (ou pelo menos algum percentual de tempo em polaridade diferente).

- Estudo da característica estática do processo TIG usando eletrodos com diferentes diâmetros, e diferentes geometrias de afiação da ponta do eletrodo, procurando definir a influência da relação entre a intensidade da corrente e o diâmetro do eletrodo na tensão do arco.

-Medições da pressão de estagnação do arco com o processo TIG usando diferentes teores de hidrogênio em mistura ao argônio no gás de proteção.

-Estudo da influência do teor de hidrogênio no aspecto diferenciado do arco (acoplamento na região do ânodo) que foi observado nos ensaios de medição da pressão de estagnação realizados sobre ânodo de cobre.

10. REFERÊNCIAS CITADAS

1. SCHWEDERSKY, M. B. **Um estudo da eficiência e produtividade dos principais processos de soldagem a arco.** Florianópolis, Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2011.
2. OLIVARES, E. A. G. **Uma abordagem técnica e científica do processo TIG Keyhole a luz de novas tecnologias e aspectos comparativos com o processo Plasma.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de pós-graduação em engenharia mecânica, Dissertação (mestrado), 2015.
3. SAVAGE, W. F.; NIPPES, E. F.; AGUSA, K. **Effect of Arc Force on Defect Formation in GTA Welding.** *Welding Journal*, jul. 1979. 212s-224s.
4. MENDEZ, P. F.; NIECE, K. L.; EAGAR, T. W. **Humping Formation in High Current GTA Welding.** International Conference on Joining of Advanced and Speciality Materials II. Cincinnati-OH; 1999.
5. MENDEZ, P. F.; EAGAR, T. W. **Penetration and defect formation in high-current arc welding.** *Welding Journal*, p. 296-306, October 2003.
6. MENDEZ, P. F. **Order of Magnitude Scaling of Complex Engineering Problems, and its Application to High Productivity Arc Welding.** Massachusetts Institute of Technology; 1999.
7. SODERSTROM, E.; MENDEZ, P. F. **Humping mechanisms present in high speed welding.** *Science and Technology of Welding and Joining*, p. 572-579, 11(5) 2006.
8. KUMAR, A.; DEBROY, T. **Toward a Unified Model to Prevent Humping Defects in Gas Tungsten Arc Welding.** *Welding Journal*, p. 292-304, Dec. 2006.
9. MAECKER, H. **Plasmaströmungen in Lichtbögen infolge eigenmagnetischer Kompression.** *Zeitschrift für Physik*, Bd. 141, S. 198-216 (1955), 1955.
10. LIN, M. L.; EAGAR, T. W. **Pressures Produced by Gas Tungsten Arcs.** *Metallurgical Transactions B*, Vol 17B, September 1986, 601-607.
11. WU, C. S.; USHIO, M.; TANAKA, M. **Analysis of the TIG welding arc behavior.** *Computational Materials Science* 7 (1997) 308-314, 1996.
12. FAN, H. G.; SHI, Y. W. **Numerical Simulation of the Arc Pressure in Gas Tungsten Arc Welding.** *Journal of Materials Processing Technology*, v. 61, p. 302-308, 1996.

13. SCHNICK, M.; FÜSSEL, U.; SPILLE-KOHOFF, A. **Numerical Investigations of the Influence of Design Parameters, Gas Composition and Electric Current in Plasma Arc Welding (PAW).** *Welding in the World*; March 2010, Volume 54, Issue 3, pp R87-R96.
14. CAMPBELL, S. W.; GALLOWAY A. M.; MCPHERSON N. A.; **Arc pressure and weld metal fluid flow while using alternating shielding gases. Part 1: arc pressure measurement.** *Science and Technology of Welding and Joining*, 2013, vol. 18, n°7, 591-596.
15. ZÄHR, J.; SCHNICK, M.; FÜSSEL, U.; LOHSE, M.; SENDE, M.; **Numerical Investigations of Process Gases and Their Influence on TIG Welding.** *Mathematical Modelling of Weld Phenomena 9* (2010), S. 111–126.
16. NOMURA, K.; MORISAKI, K.; HIRATA, Y.; **Magnetic Control of Arc Plasma and its modelling.** *Welding in the World*, Vol. 53, n°7/8, 2009 - Peer-reviewed Section.
17. NOMURA, K.; OGINO, Y.; HIRATA, Y.; **Shape Control of TIG Arc Plasma by Cusp Type Magnetic Field with Permanent Magnets.** *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, Vol. 27 (2009) No. 3 P 170-175.
18. LEDICA. <www.ledica.it> Acesso em: 17 junho 2015.
19. REIS, R. P. **Assessment of low current tandem GMAW processes with waveform control and with aid of Laser beam.** Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2009.
20. KOBAYASHI, K.; NISHIMURA, Y.; IJIMA, T.; USHIO, M.; TANAKA, M.; SHIMAMURA, J.; UENO, Y.; YAMASHITA, M.; **Practical Application of High Efficiency Twin-Arc TIG Welding Method (SEDAR-TIG) for PCLNG Storage Tank.** *Welding in the world*, Vol. 48, n° 7/8, 2004.
21. ZHANG, G. J.; LENG, X. S.; WU, L.; **Physics characteristic of coupling arc of twin-tungsten TIG welding.** *Transactions of nonferrous Met. Soc. China* 16 (2006) 813-817.
22. LENG, X. S.; ZHANG, G. J.; WU, L.; **Experimental study on improving welding efficiency of twin electrode TIG welding method.** *Science and Technology of Welding and Joining*, 2006, vol 11, n°5, 550-554.
23. LENG, X. S.; ZHANG, G. J.; WU, L.; **The characteristic of twin-electrode TIG coupling arc pressure.** *J. Phys. D: Appl. Phys.* 39 (2006) 1120-1126.

24. OGINO, Y.; HIRATA, Y.; NOMURA, K.; **Numerical analysis of the heat source characteristics of a two-electrode TIG arc.** J. Phys. D: Appl. Phys. 44 (2011) 215202 (7pp).
25. OGINO, Y.; HIRATA, Y.; KAWATA, J.; NOMURA, K.; **Numerical analysis of arc plasma and weld pool formation by tandem TIG arc.** Weld World (2013) 57:411-423.
26. OGINO, Y.; HIRATA, Y.; NOMURA, K.; **Numerical analysis on heat source characteristics of two-electrodes TIG arc.** Transaction of the JWRI. 39 (1) P.204-P.206.
27. WANG, X.; FAN, D.; HUANG, J.; HUANG, Y.; **A unified model of coupled arc plasma weld pool for double electrodes TIG welding.** J. Phys. D: Appl. Phys. 47 (2014) 275202 (14p).
28. POLYSOUDE. **Prospecto de divulgação do sistema de soldagem TIGer.** (impresso), distribuído na feira de Essen em outubro de 2013.
29. BIROLO, M. B.; **Análise de processo em soldagem TIG autógena duplo cátodo tandem objetivando alta produtividade.** Florianópolis; Trabalho de conclusão de curso (graduação) - UFSC, Curso de Engenharia de Materiais, 2010.
30. MARTINS, É. A.; **Avaliação da soldagem TIG autógena duplo cátodo Twin TIG.** Trabalho de conclusão (graduação). Universidade Federal de Santa Catarina, Curso de Engenharia de Materiais, 2010.
31. NILES, R. W.; JACKSON, C. E.; **Weld Thermal Efficiency of the GTAW Process.** Welding Journal, Welding Research Supplement, January 1975, 25-32s.
32. DUPONT, J. N.; MARDER, A. R.; **Thermal Efficiency of Arc Welding Processes.** Welding Journal, p. 406-416-s, December 1995.
33. FUERSCHBACH, P. W.; KNOROVSKY, G. A.; **A Study of Melting Efficiency in Plasma Arc and Gas Tungsten Arc Welding.** Welding Journal, p. 287-297-s, November 1991.
34. BUSZ, G.; FINKELNBURG, W.; **Thermische Lichtbögen hoher Temperatur und niedriger Brennspannung.** Zeitschrift für Physik, Bd. 138, S. 212-225 (1954).
35. VILARINHO, L. O. **O arco TIG a 100A e Argônio puro é um arco especial?** Soldagem Insp. São Paulo, Vol 14, N°4, p.353-357, Out/Dez 2009.
36. DUTRA, J. C.; **Relatório de Ensaios de levantamento de Característica estática do processo TIG.** Relatório Interno (LABSOLDA-UFSC), Agosto de 2010.
37. LANCASTER, J. F.; **The Physics of Welding,** (book), IIW, first edition 1984. Pergamon Press.

38. MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q.; **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.
39. SAEDI, H. R. **Transient Response of Plasma Arc and Weld Pool Geometry for GTAW Process**; Massachusetts Institute of Technology, Thesis, May 1983.
40. ZHOU, X.; HEBERLEIN, J. **Analysis of the arc-cathode interaction of free-burning arcs**. Plasma Sources Sci. Technol. 3 (1994) 564-574, IOP Publishing.
41. DUSHMAN, S. **Electron emission from metals as a function of temperature**. Phys. rev. v. 21, p623-636, Jun. 1923.
42. RICHARDSON, O. W. **Thermionic phenomena and the laws which govern them**. Nobel Lecture, Dec. 1929, disponível em: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1928/richardson-lecture.pdf (acessado em janeiro de 2015).
43. IMC-SOLDAGEM; **SAP: Manual de instruções**. Disponível em: http://imc-soldagem.com.br/manuais/manual_sap_v40.pdf.
44. SCHNICK, M.; DREHER, M.; ZSCHETZSCHE, J.; FUESSEL, U.; SPILLE-KOHOFF, A.; **Visualization and optimization of Shielding Gas Flows in Arc Welding**. Welding in the World Peer-reviewed Section, n°1-2 2012 Vol. 56.
45. PLANTSERVICES; **Article TIG Welding Efficiency**. Disponível em: http://www.plantservices.com/assets/Media/1010/Article_TIGWeldingEfficiency2HR.jpg.
46. RESENDE, A. A.; VILARINHO, L. O.; **Técnica Schlieren Aplicada à visualização de escoamentos em bocais de soldagem**. 15° POSMEC - Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, FEMEC/UFU, Uberlândia-MG, 2005.
47. SIEWERT, E.; WILHELM, G.; HÄSSLER, M.; SCHEIN, J.; HANSON, T.; SCHNICK, M.; FÜSSEL, U.; **Visualization of Gas Flows in Welding Arcs by the Schlieren Measuring Technique**. Welding Journal, p. 1s-5s, January 2014.
48. KAYELABY; **Refractive index of gases**. http://www.kayelaby.npl.co.uk/general_physics/2_5/2_5_7.html.