

Erick Alejandro González Olivares

**UMA ABORDAGEM TÉCNICA E CIENTÍFICA DO PROCESSO
TIG *KEYHOLE* À LUZ DE NOVAS TECNOLOGIAS E
ASPECTOS COMPARATIVOS COM O PROCESSO PLASMA**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-Graduação da Universidade
Federal de Santa Catarina em
Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Dr. Jair Carlos Dutra.
Co-orientador: Prof. Dr. Régis
Henrique Gonçalves e Silva.

**Florianópolis
2015**

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

Olivares, Erick Alejandro González
UMA ABORDAGEM TÉCNICA E CIENTÍFICA DO PROCESSO TIG
KEYHOLE A LUZ DE NOVAS TECNOLOGIAS E ASPECTOS COMPARATIVOS
COM O PROCESSO PLASMA / Erick Alejandro González Olivares
; orientador, Jair Carlos Dutra ; coorientador, Régis
Henrique Gonçalves e Silva. - Florianópolis, SC, 2015.
131 p.

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

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. TIG. 3. Construção do arco. 4.
Infocus. 5. Keyhole. I. Dutra, Jair Carlos. II. Gonçalves e
Silva, Régis Henrique. III. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
IV. Título.

Erick Alejandro González Olivares

**UMA ABORDAGEM TÉCNICA E CIENTÍFICA DO PROCESSO
TIG KEYHOLE À LUZ DE NOVAS TECNOLOGIAS E
ASPECTOS COMPARATIVOS COM O PROCESSO PLASMA**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 4 de Maio de 2015.

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Junior, Dr. Eng.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Jair Carlos Dutra, Dr. Eng.
Orientador

Prof. Régis Henrique Gonçalves e Silva, Dr. Eng.
Coorientador

Prof. Carlos Enrique Niño Borquez, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

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

Moisés Alves de Oliveira, Dr. Eng.
EMBRACO

Prof. Hélio Cordeiro de Miranda, Dr. Eng.
Universidade Federal do Ceará

Este trabalho é dedicado aos meus pais, Alex e Magaly; aos meus irmãos, Axel e Matias.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador professor Jair Carlos Dutra e coorientador professor Régis Henrique Gonçalves e Silva pelo ensinamento e oportunidade de fazer parte da equipe LABSOLDA.

Aos membros do LABSOLDA: Alberto Bonamigo Viviani, Cleber Marques, Diego Costa Correia Silva, Everton Werlang, Felipe Kalil Mendonça, Fernando Costenaro, Guilherme de Santana Weizenmann, Ivan Olszanski Pigozzo, Marcia Paula Thiel, Mateus Barancelli Schwerdersky, Renan Kindermann, Ricardo Campagnin, Hellinton Direne Filho, Julia Dornelles, Rafael Nunes, Francisco Sartori, Rafael Costa Barbosa, Luiz Eduardo dos Santos Paes, Flávio Goulart Berka, Víctor Pascuo Celva, Rodrigo da Silva Machado, Danilo Varasquim Ribeiro.

À Universidade Federal de Santa Catarina e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

À CAPES pela concessão da bolsa de Mestrado.

Ao professor Victor Vergara Diaz, pelos conselhos e apoios prestados em todo momento.

Um especial agradecimento a Patrícia Coelho da Costa por seu apoio, compreensão e ajuda em corrigir meu português nesse trabalho.

Finalizo agradecendo à minha família, pelo respeito, carinho, suporte e conselhos dados ao longo de minha vida.

“O pessimista vê dificuldade em cada oportunidade; o otimista vê oportunidade em cada dificuldade.”

(Winston Churchill)

RESUMO

Na tecnologia da soldagem existem muitas situações pouco quantificáveis que são conduzidas à categoria de paradigmas, sendo incorporadas a textos com grande respeitabilidade e, por isso, são propagadas universalmente. O presente trabalho tenta contribuir na desmistificação de uma destas situações. Trata-se do entendimento e correta interpretação de aspectos e comportamento físico-tecnológicos do processo TIG e da comparação com seu correlato, o processo Plasma, considerando vantagens e desvantagens entre ambos. Assim, para quem possui certo grau de discernimento sobre estes processos, a real vantagem do processo plasma em relação ao processo TIG residiria em que, com o plasma se consegue a técnica da soldagem denominada “*Keyhole*”. Com o desenvolvimento do processo TIG, atualmente começou a ser anunciada por fabricantes de tochas e por pesquisadores, a obtenção da mesma técnica. As razões anunciadas remetem aos detalhes construtivos das tochas, os quais produzem fenômenos físicos como é o caso da denominada constrição catódica, discutida na bibliografia atualmente disponível. Este caso é atribuído ao diferenciado desempenho do sistema de refrigeração do eletrodo, design e material da tocha, fazendo com que somente uma parte ínfima da extremidade do eletrodo emita elétrons. Isto, então, passou a ser a justificativa para a referida constrição do arco e a obtenção de determinadas características das soldas produzidas. Entretanto, outro fabricante de tocha não faz correlacionamentos com esta constrição e apenas anuncia os fabulosos resultados obtidos na técnica “*Keyhole*”. Por isso, este trabalho se propõe a fazer uma nova abordagem comparativa entre os referidos processos. São apresentadas comparações entre a tocha com a anunciada característica de constrição catódica e uma tocha convencional por meio de ensaios instrumentados, incluindo filmagem térmica das tochas. Os resultados do “*keyhole*” foram comparados com resultados de trabalhos desenvolvidos no LABSOLDA com o processo Plasma “*Keyhole*”. Os resultados obtidos demonstraram que efetivamente o processo TIG compete com o processo plasma na técnica *Keyhole*, apresentando vantagens adicionais. Esta afirmativa não se refere estritamente à tocha especial, pois com uma tocha convencional também é possível resultados semelhantes. Entretanto, o que há de vantagem irrefutável da tocha especial é a capacidade de incrementar a vida útil do eletrodo de tungstênio, em aproximadamente um 400%. A menor quantidade de parâmetros e simplicidade do processo TIG *Keyhole*, o torna mais

competitivo que o processo de soldagem Plasma neste tipo de aplicações.

Palavras-chave: TIG. Infocus. Constrição catódica. CF-TIG. *Keyhole*.

ABSTRACT

In welding technology there are many unquantifiable situations that are conducted to the category of paradigms, being incorporated into texts with great respectability and therefore are propagated universally. This work attempts to contribute to the debunking of these situations. In these sense, the correct interpretation and understanding of issues and physical-technological behavior of the TIG process and the comparison with its correlate, the Plasma process, considering advantages and disadvantages of both. Thus, for those who have some degree of knowledge into these processes, the actual advantage of the plasma process with regard to the TIG process reside in that with plasma welding can be used a technique called “*Keyhole*”. With the development of the TIG process, now began to be announced by manufacturers of torches and by researchers, obtaining the same technique. The reasons announced refer to the construction details of the torches, which produce physical phenomena such as the so-called cathodic constriction, discussed in the currently available literature. This case is assigned to the outstanding performance of the electrode cooling system, design and torch material, where only a small part of the end of the electrode emits electrons. Therefore, this became the justification for that arc constriction and obtaining certain characteristics of welds produced. However, another torch manufacturer does not co-relationships with this constriction and only announces the fabulous results obtained with the “*Keyhole*” technique. Therefore, this work aims to make a new comparative approach between those processes. Comparisons are presented between the torch with the announced cathodic constriction feature and a conventional torch through instrumented test, including thermal shoot the torches. The results of the “*Keyhole*” were compared with works made in LABSOLDA about plasma Process with “*Keyhole*”. The results showed that the TIG process effectively competes with the plasma process in *Keyhole* technique, and has additional advantages. This statement does not refer strictly to the special torch, as with a conventional torch is also possible achieve similar results. However, what is irrefutable advantage of special torch is the ability to increase the life of the tungsten electrode, in about a 400%. The smaller number of parameters and simplicity *Keyhole* TIG process makes it more competitive than Plasma welding process in such applications.

Keywords: TIG. Infocus. Cathodic constriction. CF-TIG. *Keyhole*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Regiões que compõem um arco de soldagem no processo TIG. Adaptado de Sadek et al. [3].	34
Figura 2 – Função trabalho e densidade de corrente em decorrência da corrente do arco de soldagem para diferentes composições de eletrodos de tungstênio. Adaptado de Matsuda et al. [11].	36
Figura 3 – Mudanças na função trabalho e densidade de corrente em função do tempo de arco aberto para os eletrodos (a) W-La ₂ O ₃ (b) W-ThO ₂ . Adaptado de Matsuda et al [11].	37
Figura 4 – Efeito do tempo de arco sobre a temperatura da ponta do eletrodo e a área da zona de emissão em relação ao volumem de óxidos na ponta do eletrodo W-La ₂ O ₃ . Adaptado de Matsuda et al [11].	38
Figura 5 – Ilustração esquemática da distribuição e comportamento dos óxidos acompanhado pela distribuição de temperatura ao longo do eixo do eletrodo. As setas representam a vaporização de óxidos e a área riscada representa o óxido remanescente no eletrodo depois da operação. Adaptado de Ushio et al. [12].	40
Figura 6 – Temperatura do eletrodo perto da ponta para diferentes correntes de soldagem. Adaptado Ushio et al de [12].	41
Figura 7 – Efeito da corrente do arco de soldagem sobre o desgaste do eletrodo. Adaptado de Ushio et al. [13].	42
Figura 8 - Mudança na superfície do eletrodo com a mistura de oxigênio com argônio como gás de proteção. Adaptado de Matsuda et al. [4].	43
Figura 9 – Comportamento instável do arco de soldagem devido à formação do anel de dendritas na superfície do eletrodo. Adaptado de Ushio et al [12].	43
Figura 10 – Microestrutura da superfície do eletrodo depois do arco aberto. Adaptado de Matsuda et al. [4].	44
Figura 11 – Ilustração esquemática sobre a formação do anel e distribuição dos óxidos dentro do eletrodo. Adaptado de Matsuda et al. [15].	45
Figura 12 – Princípio da constricção do cátodo no processo de soldagem TIG. Adaptado de Schnick et al. [1].	46
Figura 13 – Tocha TIG Infocus e as dimensões que influenciam o seu funcionamento. Adaptado da Patente Infocus [16].	47
Figura 14 – Relação entre o diâmetro do tubo D da tocha Infocus com o número de Reynolds usando água como líquido refrigerador. Adaptado da Patente da Infocus [16].	48
Figura 15 – Relação entre o número de Reynolds e o número de Nusselt para diferentes geometrias internas da tocha Infocus usando água como líquido refrigerador. Adaptado da Patente da Infocus [16].	48

Figura 16 – Eletrodo da tocha Infocus.	49
Figura 17 – Simulação numérica da temperatura do arco e o cátodo para uma tocha convencional TIG e a tocha Infocus com 500 A em Argônio. Adaptado de Schnick et al. [1].	50
Figura 18 – Medida da pressão do arco e tensão como função da corrente para o TIG convencional e a tocha Infocus (30° ângulo da ponta do catodo, 5 mm de distância eletrodo peça, 12 l/min Ar, EWLa-1.5). Adaptado de Schnick et al. [1].	50
Figura 19 - Tocha TIG utilizada para o desenvolvimento da K-TIG. Adaptado de Jarvis e Ahmed [2].	51
Figura 20 – Tocha TIG de alta produtividade K-TIG. Adaptado de K-TIG [17].	52
Figura 21 – Esquema do processo plasma com a técnica <i>Keyhole</i> . Adaptado de Lathabai et al. [6].	53
Figura 22 – Comparação entre processos TIG em união de juntas com (a) procedimento convencional (b) pela técnica <i>Keyhole</i> . Adaptado de K-TIG [17].	53
Figura 23 – Comparação Plasma-TIG em condições de trabalho normal. Adaptado do <i>Welding Handbook</i> [18].	54
Figura 24 – Influência da distância tocha peça (DTP) no Plasma <i>Keyhole</i> em chapas de 6,35 mm de aço carbono, argônio como gás de proteção, 3,2 mm de orifício constritor, 230 A de corrente, 19 cm/min de velocidade de soldagem e 2,4 mm de recuo do eletrodo. Adaptado de Silva de Paula [21].	55
Figura 25 – Comparação Plasma-TIG sob as mesmas condições de soldagem. Adaptado do <i>Welding Handbook</i> [18].	56
Figura 26 – Bancada de ensaios.	59
Figura 27 – Tocha Infocus.	60
Figura 28 – Tocha TIG 27B Binzel Abicor.	60
Figura 29 – Sistema de resfriamento da tocha TIG 27B Binzel Abicor.	61
Figura 30 – Bancada de filmagem do arco de soldagem.	62
Figura 31 – Aparência superficial da junta.	64
Figura 32 – Pontos de medição da tensão do arco de soldagem.	65
Figura 33 – Sistema desenvolvido para aplicar o gás de purga.	67
Figura 34 – Rampas de início e término no processo TIG <i>Keyhole</i>	68
Figura 35 – Direcionador de arame desenvolvido no LABSOLDA.	69
Figura 36 – Ponta do eletrodo com temperatura de refrigeração inferior a 15° C.	73
Figura 37 – Curvas de corrente e tensão para diferentes temperaturas de refrigeração da tocha Infocus.	74

Figura 38 - Imagens termográficas obtidas após de fazer uma junta de 27 cm com 520 A de corrente para as duas tochas estudadas.....	75
Figura 39 - Curvas temperatura-tempo após se fazer uma junta de 27 cm com 520 A de corrente para (a) Infocus (b) TIG convencional.....	75
Figura 40 - Comparação entre os eletrodos de tungstênio com conteúdo de lantânio e tório.....	76
Figura 41 – Comparação das curvas corrente-tensão das tochas Infocus e Convencional para diferentes composições de eletrodos de tungstênio de 6,35 mm de diâmetro.....	77
Figura 42 – Comparação das curvas corrente-tensão entre uma tocha convencional TIG e a Infocus. Adaptado de Schnick et al. [1].....	78
Figura 43 – Medição das áreas de emissão de elétrons e estimativa da densidade de corrente para um arco de soldagem de 400 A e temperatura de resfriamento da tocha de 15° C.....	79
Figura 44 – Superfície da ponta dos eletrodos com arco ligado e desligado para 520 A com 4 s de pós-gás de proteção (Ar+5% H_2).	81
Figura 45 – Geometria na superfície de diferentes eletrodos TIG depois de 5 uniões feitas com 520 A.	83
Figura 46 – Desgaste do eletrodo durante 30 minutos com um arco de 100 A e argônio como gás de proteção.	84
Figura 47 – Geometria da superfície do eletrodo depois de 30 minutos com um arco de 100 A ligado.....	85
Figura 48 – Mecanismo de formação do pescoço atrás do anel na superfície do eletrodo.....	85
Figura 49 – Comparação para três tipos de eletrodos de tungstênio sob as mesmas condições de soldagem com <i>Keyhole</i> estabelecido.	87
Figura 50 – Desgaste do eletrodo de tungstênio com 2% de tório depois de 10 juntas de 27 cm utilizando 520 A de corrente.....	88
Figura 51 - Desgaste do eletrodo de tungstênio com 1,5% de lantânio depois de 27 juntas de 27 cm utilizando 520 A de corrente.....	89
Figura 52 - Desgaste do eletrodo de tungstênio com 1,5% de lantânio depois de 43 juntas de 27 cm utilizando 520 A de corrente.....	90
Figura 53 – Comparação das macrografias das juntas feitas com as diferentes tochas.....	91
Figura 54 – Aspectos superficiais da face e raiz das juntas feitas com a técnica <i>Keyhole</i> com o rocesso TIG.....	92
Figura 55 – TIG <i>Keyhole</i> com eletrodo de tungstênio com 2% de tório.....	92
Figura 56 – Comparações das seções transversais para diferentes velocidades de arame fornecido pela frente (PF) e por trás (PT) do <i>Keyhole</i>	93

Figura 57 – Largura da face dos cordões feitos com adição de arame pela frente (PF) e por trás (PT) do <i>Keyhole</i> .	94
Figura 58 – Largura da raiz dos cordões feitos com adição de arame pela frente (PF) e por trás (PT) do <i>Keyhole</i> .	95
Figura 59 – Adição de material por trás do <i>Keyhole</i> .	95
Figura 60 – Aparência superficial das juntas com 4,5 m/min de adição de material.	96
Figura 61 – Reforço na face das juntas feitas com adição de arame pela frente (PF) e por trás (PT) do <i>Keyhole</i> .	97
Figura 62 - Reforço na raiz das juntas feitas com adição de arame pela frente (PF) e por trás (PT) do <i>Keyhole</i> .	97
Figura 63 – Zona afetada pelo calor (ZAC) para diferentes velocidades de arame.	98
Figura 64 – Comportamento do <i>Keyhole</i> em diferentes velocidades de soldagem.	99
Figura 65 – Efeito do desgaste do eletrodo sobre o <i>Keyhole</i> para uma velocidade de 50 cm/min para um mesmo cordão.	99
Figura 66 – Desgaste do eletrodo para uma velocidade de soldagem de 50 cm/min com argônio como gás de proteção usando a técnica <i>Keyhole</i> .	100
Figura 67 – Aparência superficial e transversal das juntas para diferentes velocidades de soldagem usando Ar+5%H como gás de proteção.	101
Figura 68 – Análise das larguras da face e raiz das juntas para diferentes velocidades de soldagem.	102
Figura 69 – Reforço da raiz para diferentes velocidades de soldagem.	102
Figura 70 – Zona Afetada pelo Calor (ZAC) para diferentes velocidades de soldagem.	103
Figura 71 - Influência da distância eletrodo peça no TIG <i>Keyhole</i> com argônio como gás de proteção.	104
Figura 72 - Influência da distância eletrodo peça no TIG <i>Keyhole</i> com Ar+5%H como gás de proteção.	105
Figura 73 – Largura da face para as juntas feitas com argônio e mistura Ar+5%H como gás de proteção para diferentes DEP.	105
Figura 74 - Largura da raiz para as juntas feitas com argônio e mistura Ar+5%H como gás de proteção para diferentes DEP.	106
Figura 75 - Reforço da raiz para as juntas feitas com argônio e mistura Ar+5%H como gás de proteção para diferentes DEP.	106
Figura 76 - ZAC para as juntas feitas com argônio e mistura Ar+5%H como gás de proteção para diferentes DEP.	107

Figura 77 – Potência utilizada para as juntas feitas com argônio e mistura Ar+5%H como gás de proteção para diferentes DEP.	108
Figura 78 - Estabilidade do TIG <i>Keyhole</i> para diferentes distâncias eletrodo peça usando Argônio como gás de proteção.....	109
Figura 79 – Juntas tubo-membrana de painéis de caldeira feita através do processo MIG/MAG.	110
Figura 80 - Design do corpo de prova para os ensaios de tubos e membranas.	111
Figura 81 – Esquema do posicionamento da tocha e o material de adição.	111
Figura 82 – Junta tubo-membrana (a) corte transversal (b) face da junta (c) raiz da junta.	112
Figura 83 – Raios X da junta tubo e membrana.....	113
Figura 84 – Imperfeição na junta membrana-tubo.....	113
Figura 85 – Macrografia da seção transversal do cordão feito com TIG <i>Keyhole</i> Pulsado.	115
Figura 86 – Comparação das larguras dos cordões de solda para diferentes DTP entre os processos Plasma e TIG utilizando a técnica <i>Keyhole</i> sobre chapas de aço SAE 1020 de 6,35 mm de espessura.	116
Figura 87 – Comparação das ZAC para diferentes DTP entre os processos Plasma e TIG utilizando a técnica <i>Keyhole</i> sobre chapas de aço SAE 1020 de 6,35 mm de espessura.....	117
Figura 88 – Comparação da largura da raiz para diferentes DTP nos processos Plasma e TIG utilizando a técnica <i>Keyhole</i> sobre chapas de aço SAE 1020 de 6,35 mm de espessura.	117
Figura 89 - Comparação do reforço da raiz para diferentes DTP nos processos Plasma e TIG utilizando a técnica <i>Keyhole</i> sobre chapas de aço SAE 1020 de 6,35 mm de espessura.	118
Figura 90 – Equipamento utilizado para o processo TIG e Plasma <i>Keyhole</i> . ..	122
Figura 91 – Comparação entre os processos Plasma e TIG utilizando a técnica <i>Keyhole</i>	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Pontos de fusão para diferentes óxidos.....	39
Tabela 2 – Medições de temperatura e emissividade ao longo da ponta do eletrodo para vários tipos de eletrodos durante 30 min de arco aberto a 150 A em Argônio puro. Adaptado de Ushio et al. [12].....	41
Tabela 3 – Descrição dos equipamentos utilizados.	59
Tabela 4 – Equipamentos para a captura de imagens e filmagem do desgaste e mancha catódica do arco de soldagem.....	63
Tabela 5 – Equipamentos para a captação de imagens e filmagem da dinâmica do <i>Keyhole</i>	63
Tabela 6 – Parâmetros de soldagem.	65
Tabela 7 – Condições utilizadas para o desgaste do eletrodo	66
Tabela 8 – Parâmetros utilizados nos ensaios do estudo do <i>Keyhole</i>	66
Tabela 9 - Tempos das rampas de início e término usados nos ensaios com TIG <i>Keyhole</i>	68
Tabela 10 - Parâmetros utilizados nos ensaios do <i>Keyhole</i> com adição de material.....	69
Tabela 11 – Velocidades de soldagem estudadas.	70
Tabela 12 – Condições para o estudo da velocidade de soldagem no <i>Keyhole</i> ..	70
Tabela 13 – Plano de ensaio para o estudo da DEP.	70
Tabela 14 – Condições para os ensaios da DEP.	71
Tabela 15 - Condições e parâmetros de soldagem para tubos e membranas....	110
Tabela 16 – Parâmetros usados para o <i>Keyhole</i> pulsado.	114
Tabela 17 – Comparação de faixas de operação entre o processo TIG e o Plasma com <i>Keyhole</i> para diferentes espessuras de aço carbono SAE 1020.....	119
Tabela 18 – Comparação de parâmetros elétricos entre o processo Plasma e TIG com a técnica <i>Keyhole</i> em chapas de aço carbono SAE 1020 de 6,35 mm de espessura e argônio como gás de proteção, para uma DTP 2 mm.	119
Tabela 19 – Comparação entre os processos Plasma e TIG <i>Keyhole</i> . Adaptado de K-TIG [17].....	123

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TIG – *Tungsten Inert Gas*

LASER – *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*

AVC – *Arc Voltage Control*

Tc – Temperatura do Catodo

ϕ' – Função Trabalho

j_{eR} – Densidade de corrente

A – Constante de Richardson

e – Carga do elétron

k_B – Constante de Boltzmann

AWS – *American Welding Society*

TWI – *The Welding Institute*

DVS – *German Welding Society*

D – Diâmetro tubo de refrigeração interno da tocha Infocus.

H – Distância entre o tubo de refrigeração e o corpo da tocha Infocus.

DTP – Distância Tocha Peça.

DEP – Distância Eletrodo Peça.

I – Corrente.

T – Tensão.

ZAC – Zona Afetada pelo Calor.

trci – tempo de rampa de corrente de incio.

trcf – tempo de rampa de corrente final.

trvi – tempo de rampa de velocidade de soldagem de incio.

trvf – tempo de rampa de velocidade de soldagem final.

Vs – Velocidade de soldagem.

Va – Velocidade de arame.

PF – Adição de arame pela frente da poça de soldagem.

PT – Adição de arame por atrás da poça de soldagem.

MIG/MAG – *Metal Inert Gas / Metal Active Gas.*

SUMARIO

1.	INTRODUÇÃO E OBJETIVO GERAL	29
1.1.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	30
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEORICA	34
3.	METODOLOGIA	59
3.1.	EQUIPAMENTO	59
3.1.1.	Tocha Infocus.....	60
3.1.2.	Tocha TIG 27B BINZEL ABICOR.....	60
3.1.3.	Eletrodos de tungstênio	61
3.1.4.	Imagens.....	62
3.1.5.	Material base.....	63
3.2.	ESTUDOS	64
3.2.1.	Efeito da temperatura de resfriamento da tocha sobre o comportamento do arco	64
3.2.2.	Desgaste do eletrodo	66
3.2.3.	TIG <i>Keyhole</i>	66
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	73
4.1.	EFEITO DA TEMPERATURA DE REFRIGERAMENTO DA TOCHA SOBRE O COMPORTAMENTO DO ARCO	73
4.2.	DESGASTE DOS ELETRODOS	80
4.3.	TIG <i>KEYHOLE</i>	86
4.3.1.	<i>Keyhole</i> com adição de material.....	92
4.3.2.	Efeito da velocidade de soldagem no <i>Keyhole</i>	98
4.3.3.	Distância eletrodo peça (DEP)	103
4.4.	FABRICAÇÃO DE PAREDES DE CALDEIRA ATRAVÉS DO PROCESSO TIG <i>KEYHOLE</i>	109
4.5.	COMPARAÇÃO ENTRE OS PROCESSOS PLASMA E TIG <i>KEYHOLE</i>	115
5.	CONCLUSÕES	125
6.	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	127
7.	REFERÊNCIAS	129

1.INTRODUÇÃO E OBJETIVO GERAL

A expressão do pensamento humano com a conseqüente necessidade de transmissão dos conhecimentos conduziu a humanidade à criação dos idiomas falados e à criação da escrita. Ambas as ferramentas, entretanto, são apenas tentativas um tanto longínquas para a expressão do que se passa na cabeça de cada ser humano. Um pensamento ao ser expresso por qualquer das duas formas, não retrata fielmente o que o agente realmente pensou. Quando qualquer das duas formas de expressão alcança o receptor, a interpretação fica ainda mais distante do que o emissor realmente pensou. Em função, então, da distância entre o real pensamento e da interpretação deste por um receptor, muitos conflitos pessoais podem ser gerados. Quando a interlocução transcende as relações pessoais e passa a influir coletivamente, os efeitos de uma má linguagem ou de uma má escrita podem conduzir a efeitos muito danosos para a humanidade. Dentro deste envolvimento se situam os paradigmas até universais que envolvem com freqüência entidades tidas como muito contributivas para a humanidade. É o caso de livros que indistintamente são considerados como propulsores do conhecimento humano. Eles podem realmente se constituir neste propulsor do conhecimento, como podem, por outro lado, conduzir a um entendimento restrito e errôneo do que de fato é real.

Tal problemática afeta inclusive o universo da Tecnologia, contrastando com o fato de ser esta enquadrada em muitas de suas vertentes como uma ciência Exata. Deve-se, no entanto, ressaltar que este enquadramento é consequência de uma tentativa do ser humano de colocar de maneira didática os conhecimentos, pela elaboração de classificações para tudo o que o rodeia. Para as ciências, as classificou principalmente em ramo das ciências exatas e ramo das ciências humanas. Uma ciência seria considerada exata se fosse capaz de expressões quantitativas, predições precisas e métodos rigorosos de testar hipóteses. Neste contexto estariam a matemática, a física, as engenharias, a estatística e a computação. Entretanto, se poderia dizer que a matemática não é uma ciência, mas sim uma ferramenta para o desenvolvimento das ciências, pois a matemática sozinha não serve para nada. Uma ciência estaria na área de humanas se fosse dedicada a desvendar o intrínseco do ser humano. Neste sentido os caminhos são muito mais subjetivos, dada a complexidade do ser humano. Um outro ramo das ciências é tratado como se não tivesse nada a ver com a área de

exatas e tão pouco com a área de humanas. É a área de ciências biológicas.

Embora estas classificações sejam vigentes, elas de fato, frequentemente não refletem a realidade. A própria matemática não é exata em muitas situações, como é o caso das dízimas periódicas. Alguns casos nas ciências biológicas são muito mais quantificáveis do que alguns que são enquadrados nas ciências exatas. A margem de erro em alguns setores das ciências exatas é ainda muito grande. Além disso, existem muitas situações pouco quantificáveis que são conduzidas à categoria de paradigmas, sendo incorporadas a textos com grande respeitabilidade e, por isso, são propagadas universalmente. O presente trabalho tem como objetivo geral contribuir na desmistificação de uma destas situações.

Trata-se do entendimento e correta interpretação de aspectos e comportamento físico-tecnológicos do processo TIG *Keyhole* e da comparação com seu correlato, o processo Plasma, considerando vantagens e desvantagens entre ambos. Tal empreendimento se justifica pelo fato de que, pela leitura da literatura clássica, o leitor é conduzido a interpretar que o processo plasma possui quase que exclusivamente características vantajosas em relação ao TIG. Entretanto, à medida que novos ensaios e desenvolvimentos tecnológicos vão sendo empreendidos, se constata exatamente o contrário.

1.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como poderá ser visto na fundamentação teórica, o princípio básico dos processos TIG e plasma é o mesmo. A designação plasma, na verdade, confunde a muitos, pois o processo TIG, de mesma forma que todos os processos a arco, produz plasma. Uma razão de ordem semântica para a utilização específica do nome plasma seria no caso da versão plasma com arco não transferido. Neste caso, o aquecimento da peça não acontece pela ação direta de um arco, mas sim por um plasma oriundo de um arco. Quando não for este o caso, a diferença entre o processo designado por plasma e o processo TIG se situa fundamentalmente no desenho da tocha. No caso do processo designado como plasma, o arco, formado entre um eletrodo de tungstênio e a peça, é forçado a passar por um estrangulamento. Este estrangulamento, conforme será apresentado, é obtido pelo denominado bico constritor. Segundo grande parte da literatura, esta constrição concentra energia e

daí surgem um sem número de conclusões de super vantagens do plasma em relação ao TIG. Estas vantagens são exaltadas até em casos onde a referida constrição não conduziria a benefícios tecnológicos. É o caso da versão de processo plasma denominado de PTA (Plasma Transferred Arc - igualmente nomeada de maneira equivocada, pois o processo designado como PAW, com arame ou sem, também tem arco transferido) utilizado primordialmente para revestimentos a partir de pós metálicos. Nestes casos, não se deseja concentração de energia e a utilização do bico constritor é por razões tecnológicas de injeção do pó.

Assim, para quem possui certo grau de discernimento sobre estes processos, a real vantagem do processo plasma em relação ao processo TIG residiria em que, com o plasma se consegue a técnica da soldagem denominada “*Keyhole*”. Esta técnica é obtida pela pressão do arco (para alguns, pelo jato de plasma) exercida sobre a poça metálica, produzindo um furo passante (*Keyhole*) de metal líquido que é fechado à medida em que a tocha avança ao longo da solda. Todavia, com o desenvolvimento do processo TIG, atualmente começou a ser anunciada por fabricantes de tochas e por pesquisadores do processo TIG, a obtenção da mesma técnica por meio da utilização deste processo. Além disso, têm sido anunciados detalhes construtivos de tochas, os quais produzem fenômenos físicos como é o caso da denominada constrição catódica, discutida nos trabalhos publicados por Schnick [1]. Este caso é atribuído ao diferenciado desempenho do sistema de refrigeração do eletrodo, design e material da tocha, fazendo com que somente uma parte ínfima da extremidade do eletrodo emita elétrons. Isto, então, passou a ser a justificativa para a referida constrição do arco e a obtenção de determinadas características das soldas produzidas. Entretanto, um outro fabricante de tocha [2] não faz co-relacionamentos com esta constrição e apenas anuncia os fabulosos resultados obtidos na técnica “*Keyhole*”.

Assim, diante das experiências próprias do LABSOLDA na utilização dos processos TIG e plasma e diante do apresentado no mercado e na literatura atual, o presente trabalho se propõe a fazer uma nova abordagem comparativa entre os referidos processos, seguindo os seguintes passos:

- De posse de uma tocha com a anunciada característica de constrição catódica, fazer ensaios instrumentados, inclusive com filmagem térmica das tochas, para a constatação da obtenção da técnica “*Keyhole*” e

comparar os resultados com uma tocha com tecnologia convencional, mas com capacidade de corrente que seja comparativa a utilizada na tocha especial.

- Comparar os resultados obtidos no item anterior com trabalhos desenvolvidos no LABSOLDA sobre o processo Plasma “*Keyhole*”.
- Realização de ensaios metodológicos a fim de comprovar a real fundamentação da citada constrição catódica da tocha especial.
- Realização de ensaios metodológicos a fim de determinar a influência das diferentes composições dos eletrodos de tungstênio, uma vez que o eletrodo utilizado na tocha especial (de constrição catódica) possui a composição AWS A5.12 EWLa-1.5.

2.FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No processo de soldagem TIG, o arco de soldagem é estabelecido entre um eletrodo de tungstênio e a peça de trabalho com um gás de proteção entre eles, geralmente inerte (argônio ou hélio), para excluir o ar e prevenir a contaminação do eletrodo e a poça fundida, além de servir como meio para estabelecer e obter um arco de soldagem estável.

Nos trabalhos de Sadek et al. [3] e Matsuda et al. [4], a superfície do eletrodo no processo de soldagem TIG, quando o arco voltaico esta aceso, é dividido em três áreas com funções e características específicas (Figura 1). Na região A encontra-se a zona de emissão de elétrons (mancha catódica), que possui uma aparência livre dos óxidos contidos dentro do eletrodo, devido a sua alta temperatura. A região B é a zona de vaporização de óxidos e possui uma superfície de aparência lisa. Enquanto a região C é a zona de deposição de óxidos e possui uma aparência rugosa. As três zonas e suas funções fazem parte do mecanismo de funcionamento do arco de soldagem TIG.

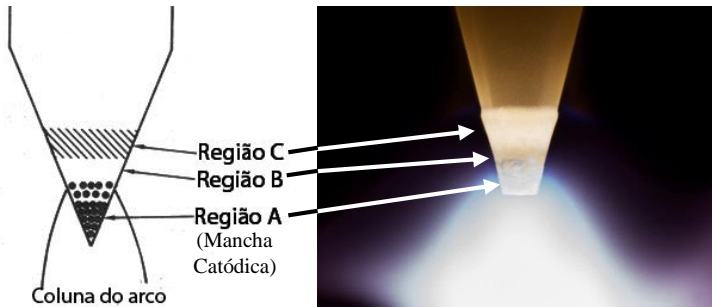


Figura 1 – Regiões que compõem um arco de soldagem no processo TIG.
Adaptado de Sadek et al. [3].

Novos desenvolvimentos em tochas TIG têm como foco principal o eletrodo [5,6,7,1], em especial sua influência sobre a região A da Figura 1, destacada por ser a zona de emissão dos elétrons e, portanto, principal responsável pelas propriedades resultantes do arco de soldagem (pressão, temperatura e estabilidade).

Os eletrodos utilizados no processo TIG são feitos de materiais refratários, que suportam a temperatura de trabalho e mantém sua

integridade. Quando esses eletrodos estão na polaridade negativa, o eletrodo emite elétrons a temperaturas altas através de um mecanismo chamado de emissão termiônica, o qual se aceita como a forma predominante de emissão de elétrons no processo TIG. O aquecimento dos eletrodos não consumíveis inicia-se com a abertura do arco, seja por alta tensão e alta frequência em que um pulso de tensão ioniza o meio entre o eletrodo e a peça, ou por curto-circuito com corrente controlada, em que o baixo valor de corrente é suficiente para aquecer a ponta do eletrodo até a condição da emissão termiônica. Juntamente com o arco, surgem possíveis fontes de calor para maior aquecimento do eletrodo e facilitação da emissão termiônica. Dentre essas fontes estariam, o efeito Joule, a radiação do arco, a energia das reações exotérmicas na superfície do eletrodo e as energias térmica e cinética dos íons que se chocam contra o cátodo [8].

O efeito termiônico é observado quando elétrons escapam do material ao serem excitados com uma energia térmica superior à sua função trabalho, que é a energia mínima para remoção de um elétron do material. Esse efeito leva ao aparecimento de uma nuvem eletrônica ao redor do material, que dificulta ou impede a saída de outros elétrons. No caso uma diferença de potencial seja aplicada entre o cátodo e o ânodo de um material nessa condição, inicia-se a passagem da corrente termiônica e elimina-se a nuvem e sua influência na emissão de novos elétrons.

Por outro lado, a prática ao longo dos anos mostra que em eletrodos consumíveis o mecanismo de emissão predominante não é o termiônico (a emissão é dita ser por campo). Guile [9] e Lancaster [10] justificam que materiais com baixo ponto de ebulição são incapazes de atingir temperaturas suficientemente altas para que a emissão termiônica tenha um papel significativo na intensidade de corrente produzida.

A equação 1 de Richardson-Schottky, quantifica a densidade de corrente produzida por efeito termiônico, onde “ j_{eR} ” é a densidade de corrente (A/mm^2), “ A ” é a constante de Richardson ($A/[m^2K^2]$), que depende do material, da temperatura e da contaminação da superfície do eletrodo, “ T ” é a temperatura do eletrodo (K), “ e ” é a carga do elétron (C), “ ϕ ” é a função trabalho do material em função da temperatura (eV) e “ k_B ” é a constante de Boltzmann (J/K). Através dessa equação é possível entender, de melhor maneira, a importância do eletrodo no processo TIG e sua composição.

$$j_{eR} = AT^2 e^{\left(-\frac{e\phi}{k_B T}\right)} \quad (1)$$

No trabalho de Matsuda et al [11] foi assumido que a emissão de elétrons ocorre ao longo da Região A (Figura 1), portanto, a densidade de corrente foi calculada a partir da superfície dessa área na ponta do eletrodo. A função trabalho foi obtida através da equação 1, enquanto a distribuição de temperatura sobre a superfície do cátodo foi medida com um termômetro infravermelho segundo o procedimento descrito por Matsuda [11]. O resultado dessas análise é observado na Figura 2, que mostra a densidade de corrente calculada e a função trabalho dependendo da corrente de soldagem, para várias ligas de eletrodo em argônio puro. Analisando a Figura 2 é possível concluir que ao aumentar a corrente a função trabalho também aumenta, fenômeno atribuído ao incremento da temperatura do eletrodo ao elevar a corrente.

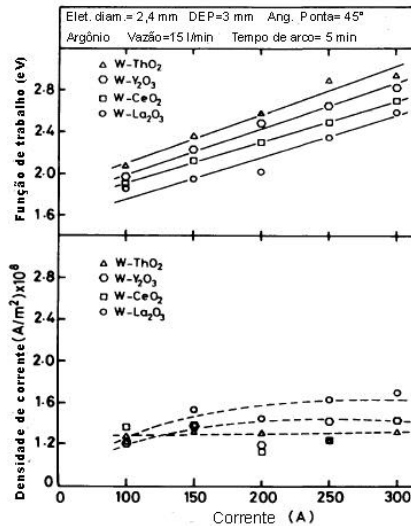


Figura 2 – Função trabalho e densidade de corrente em decorrência da corrente do arco de soldagem para diferentes composições de eletrodos de tungstênio.

Adaptado de Matsuda et al. [11].

Por outro lado, o eletrodo W-La₂O₃ apresenta os menores valores de função de trabalho em comparação aos outros eletrodos pesquisados, nesse caso, pode-se dizer que a superioridade do eletrodo W-La₂O₃ é

resultado da sua capacidade para emitir elétrons facilmente. A razão desse fenômeno se explica através do comportamento dos óxidos durante o arco aberto, é descrito como: o óxido de La possui uma fácil migração e é continuamente fornecido à superfície do eletrodo, enquanto no caso do eletrodo W-ThO₂, os átomos difundidos que alcançam a superfície são Th puros, que possuem uma função trabalho maior que o óxido de La. Por outro lado, no caso do eletrodo W-Y₂O₃ a migração de Y₂O₃ é muita mais baixa que o La₂O₃, portanto, a superfície do eletrodo não tem suficiente quantidade de óxido para trabalhar como bons emissores.

Para observar claramente o que foi descrito, os eletrodos W-La₂O₃ e W-ThO₂ foram testados com uma corrente constante de 200 A, durante um prolongado tempo de arco aberto. A função trabalho foi calculada novamente e apresentada na Figura 3.

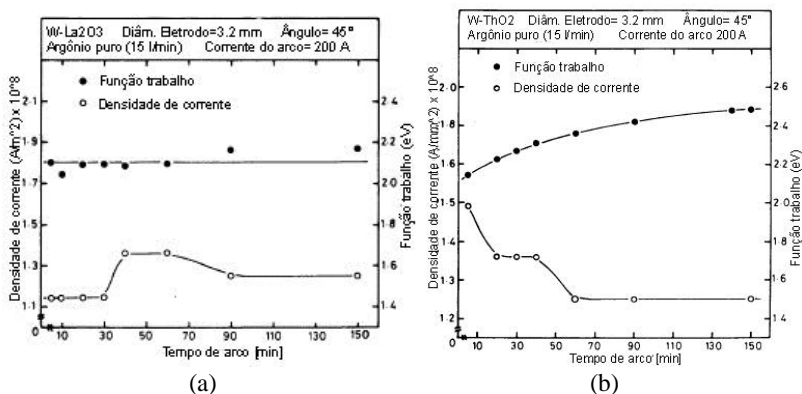


Figura 3 – Mudanças na função trabalho e densidade de corrente em função do tempo de arco aberto para os eletrodos (a) W-La₂O₃ (b) W-ThO₂. Adaptado de Matsuda et al [11].

Aparentemente, no caso do eletrodo W-La₂O₃ a mudança na função trabalho é pequena e pode ser considerado um valor constante (aprox.. 2,1 eV). Também é notado que a densidade de corrente muda com o tempo, enquanto a função trabalho é praticamente constante. Isso se pode explicar a través da Figura 4 que mostra como a área de emissão e temperatura da ponta do eletrodo muda em função do tempo de arco aberto, além, mostra a fração de volume média de La₂O₃ para três períodos de arco aberto.

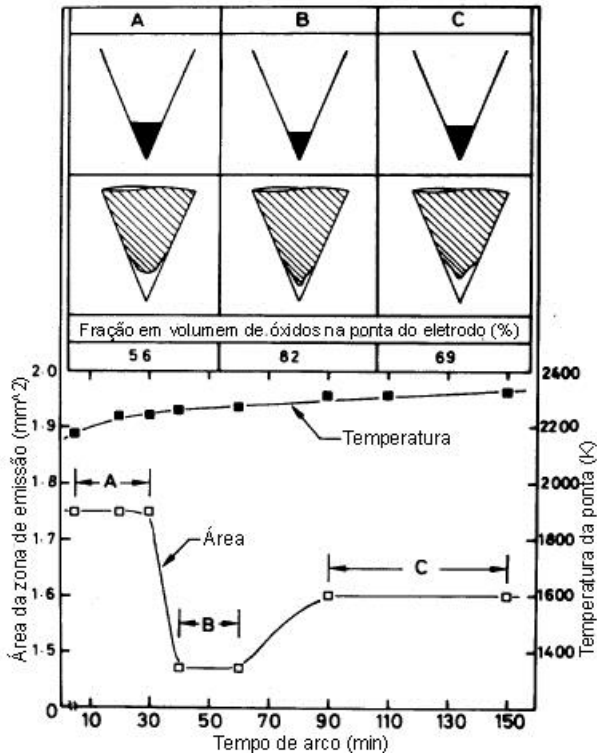


Figura 4 – Efeito do tempo de arco sobre a temperatura da ponta do eletrodo e a área da zona de emissão em relação ao volume de óxidos na ponta do eletrodo W-La₂O₃. Adaptado de Matsuda et al [11].

Através da Figura 3 e Figura 4 é possível notar que no período de tempo de 10 a 30 min a área de emissão é maior, enquanto o volume de La₂O₃ e as densidades de corrente na ponta do eletrodo são menores. Logo, o La₂O₃ reage com o tungstênio formando tungstato e oxytungstato, migrando para a ponta do eletrodo e diminuindo a área de emissão, aumentando a densidade da corrente. Depois de um longo tempo de arco aberto, a vaporização de óxidos se eleva, diminuindo o volume de La₂O₃ disponível na ponta do eletrodo e, conseqüentemente, aumentando a área de emissão. Por outro lado, a temperatura da ponta do eletrodo teve uma leve variação no período estudado, o qual explicaria as pequenas mudanças na função trabalho.

Segundo o anteriormente exposto é possível notar que a densidade de corrente é função da migração e vaporização dos óxidos presentes no eletrodo de tungstênio, enquanto a função trabalho é função da temperatura e do volume de óxidos na superfície do eletrodo [11]. Por outro lado, no caso do eletrodo W-ThO₂ a função trabalho aumenta ao longo do tempo de arco aberto, o qual pode significar uma baixa migração de ThO₂ para a ponta do eletrodo.

A taxa de migração aumenta consideravelmente com a elevação do gradiente de temperatura. Esta hipótese é sustentada pelas baixas temperaturas de fusão dos óxidos (Tabela 1). As taxas de migração mais altas foram observadas para o CeO₂, devido ao baixo ponto de fusão do óxido. Esse óxido migra facilmente e é continuamente fornecido para a ponta do eletrodo. Portanto, o consumo de óxido no Ce-W é muito mais alto que nos outros eletrodos. Na Figura 5 é possível notar o descrito anteriormente para o eletrodo Ce-W, além de observar que a localização da zona de fusão de óxidos (tarja preta) é diferente para cada tipo de eletrodo, e depende principalmente das características de cada tipo de óxido. No caso do eletrodo com conteúdo de cério a zona de fusão de óxidos fica bem atrás da ponta do eletrodo, além de possuir uma vaporização homogênea de óxidos ao longo da superfície.

Tabela 1 – Pontos de fusão para diferentes óxidos.

Tipo de óxido	ThO₂	La₂O₃	CeO₂	Y₂O₃
Ponto de fusão [K]	2028	1773	1363	2473

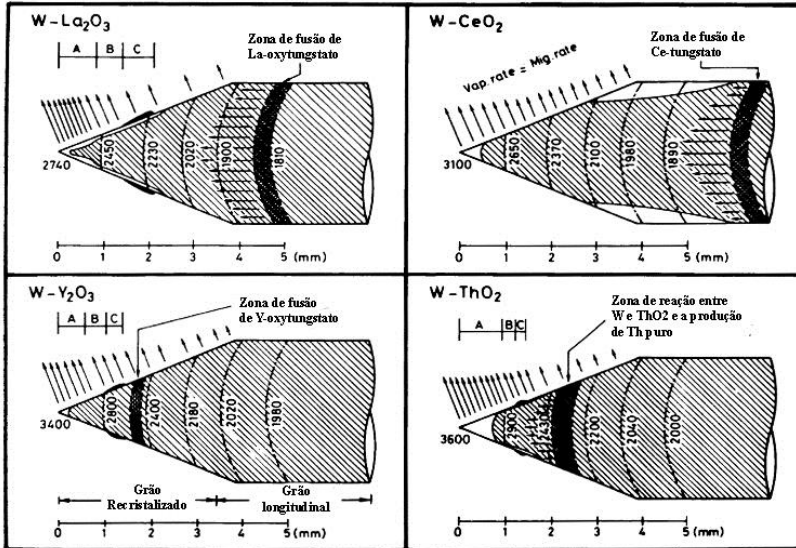


Figura 5 – Ilustração esquemática da distribuição e comportamento dos óxidos acompanhado pela distribuição de temperatura ao longo do eixo do eletrodo. As setas representam a vaporização de óxidos e a área riscada representa o óxido remanescente no eletrodo depois da operação. Adaptado de Ushio et al. [12].

Devido à importância da temperatura sobre o comportamento dos óxidos contidos nos eletrodos, Ushio et al. [12] fizeram medições de temperatura e emissividade em condições de arco aberto e para diferentes ligas de eletrodos, utilizando um termômetro infravermelho. Os resultados são apresentados na Tabela 2, nota-se que o eletrodo com conteúdo de Lantânio possui uma menor temperatura na ponta, devido à alta emissividade térmica que possui o óxido de Lantânio.

Tabela 2 – Medições de temperatura e emissividade ao longo da ponta do eletrodo para vários tipos de eletrodos durante 30 min de arco aberto a 150 A em Argônio puro. Adaptado de Ushio et al. [12].

		Ponta	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm
W-ThO ₂	Temperatura [K]	3613	2873	2433	2193	2063	1983
	Emissividade	0,18	0,25	0,27	0,34	0,38	0,38
W-CeO ₂	Temperatura [K]	3073	2673	2303	2093	1963	1893
	Emissividade	0,22	0,26	0,32	0,36	0,38	0,39
W-La ₂ O ₃	Temperatura [K]	2713	2453	2223	2023	1913	1773
	Emissividade	0,30	0,33	0,37	0,37	0,43	0,43

Por outro lado, quando o eletrodo é usado com correntes acima do recomendado pelo fabricante, a distribuição de temperaturas se torna mais irregular ao longo da ponta do eletrodo. Na Figura 6 se observa a mudança da distribuição de temperaturas para diferentes correntes de soldagem. O gradiente de temperaturas perto da ponta do eletrodo apresenta um comportamento diferente, percebe-se que a temperatura diminui enquanto aumenta a corrente, fenômeno devido principalmente ao resfriamento produzido pela emissão de elétrons e efeitos geométricos [12].

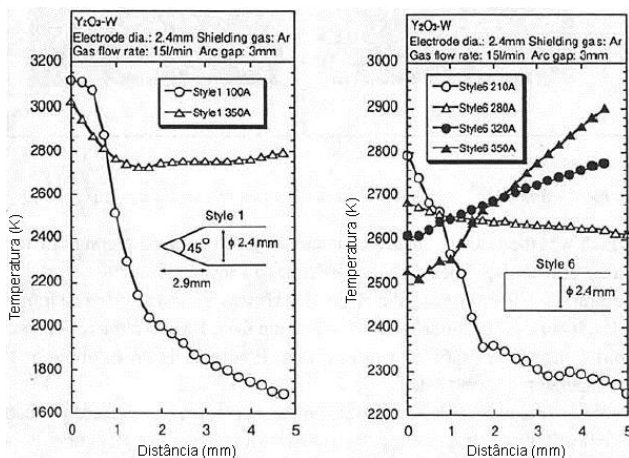


Figura 6 – Temperatura do eletrodo perto da ponta para diferentes correntes de soldagem. Adaptado Ushio et al de [12].

O resfriamento por emissão de elétrons, observado na Figura 6, afeta a vida do eletrodo, sendo que para correntes acima de 400 A esse se torna um fato a ser considerado. Porém, o eletrodo Ce-W não segue esse comportamento, já que a taxa de vaporização dos óxidos é maior que o resto dos eletrodos, portanto, não consegue manter óxidos suficientes para uma corrente de 500 A. Na Figura 7 se observa o comentado.

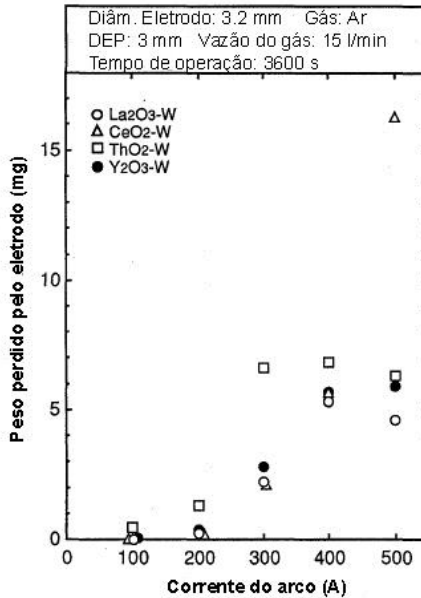


Figura 7 – Efeito da corrente do arco de soldagem sobre o desgaste do eletrodo. Adaptado de Ushio et al. [13].

A introdução de oxigênio no gás inerte de proteção promove o forte crescimento de dendritas de tungstênio na zona C da Figura 1, formando com o passar do tempo um anel ou coroa como se observa na Figura 8. O anel de dendritas de tungstênio provoca uma instabilidade do arco, conseqüentemente, influencia as medições de tensão e pressão do arco de soldagem (Figura 9). O tamanho e a forma do anel de dendritas dependem do tempo de arco aberto e da corrente de soldagem [14,4].

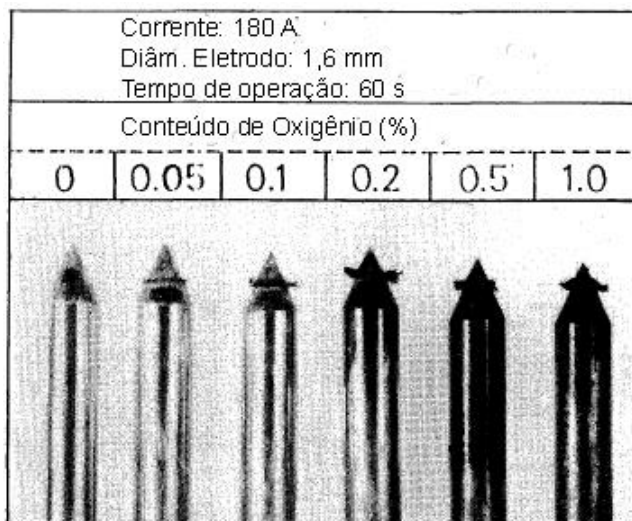


Figura 8 - Mudança na superfície do eletrodo com a mistura de oxigênio com argônio como gás de proteção. Adaptado de Matsuda et al. [4].

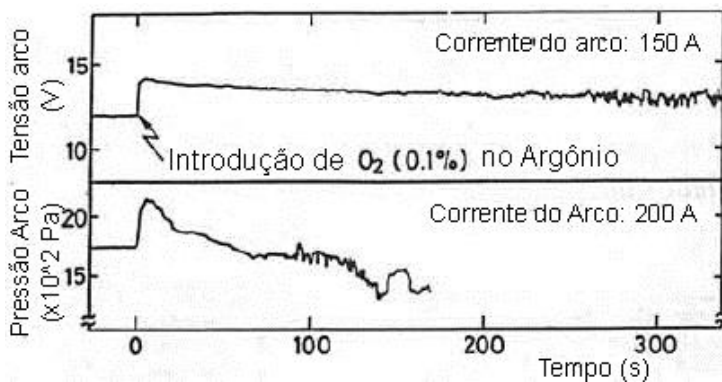


Figura 9 – Comportamento instável do arco de soldagem devido à formação do anel de dendritas na superfície do eletrodo. Adaptado de Ushio et al [12].

Por outro lado, a microestrutura na superfície do eletrodo apresenta diferentes geometrias dependendo da área que se analisa (Figura 1). Na Figura 10 se observa a microestrutura da superfície de um eletrodo com 1% de cério, notando-se que a zona de formação do anel e onde os óxidos são depositados, apresenta um crescimento dendrítico

colunar na superfície do eletrodo, enquanto a zona de emissão de elétrons apresenta uma geometria mais rugosa e pouco definida.

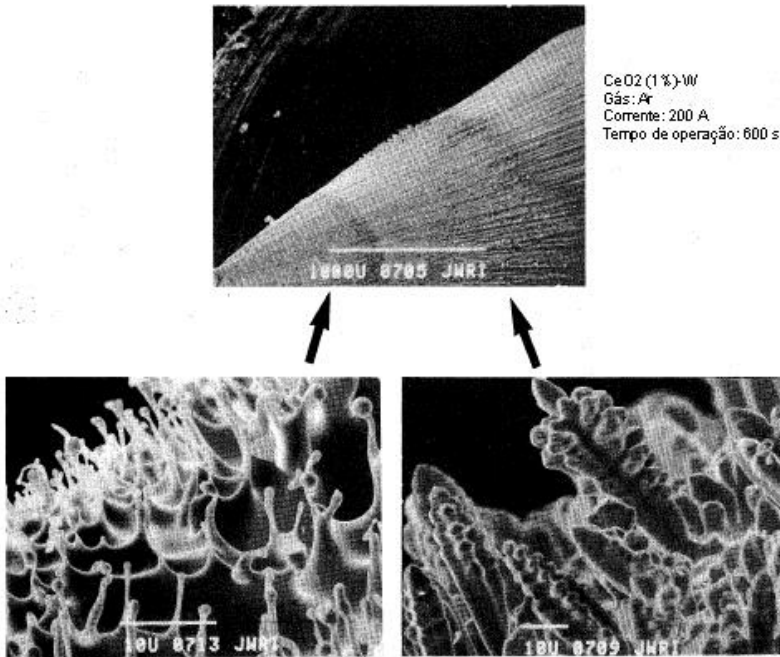


Figura 10 – Microestrutura da superfície do eletrodo depois do arco aberto.
Adaptado de Matsuda et al. [4].

O anel descrito por Matsuda et al. [15] é originado principalmente sobre a superfície do eletrodo através da oxidação do tungstênio. O tungstênio é facilmente oxidável e produz WO_3 , que pode sublimar e decompor-se a uma temperatura relativamente baixa. O óxido de tungstênio viaja através do gás de proteção, que continuamente é induzido dentro da área próxima ao arco de soldagem, e através da decomposição do WO_3 o tungstênio puro se deposita sobre a região da superfície com as condições mais adequadas para o crescimento dendrítico (zona C da Figura 1). A Figura 11 ilustra o descrito.

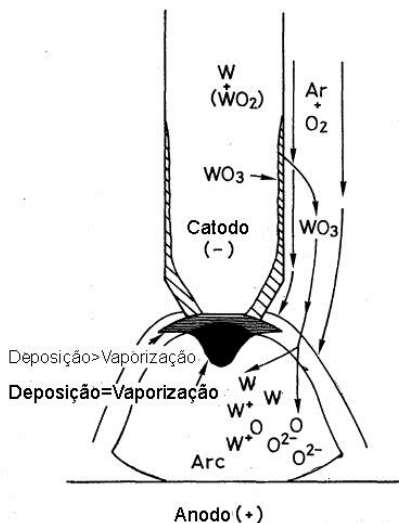


Figura 11 – Ilustração esquemática sobre a formação do anel e distribuição dos óxidos dentro do eletrodo. Adaptado de Matsuda et al. [15].

Com base no que foi dito é possível notar a relevância que possui a composição e a temperatura do eletrodo sobre as três regiões dentro do arco TIG, as quais determinam as propriedades do arco de soldagem e a vida do eletrodo. Neste sentido, as novas tecnologias em tochas TIG estão focadas em aumentar a vida do eletrodo de tungstênio e em elevar as propriedades do arco de soldagem através da emissão de elétrons.

Um exemplo do citado no paragrafo anterior é a tocha de desenvolvimento alemã, chamada Infocus, que possui um sistema de refrigeração centrado no eletrodo e é capaz de limitar a superfície térmica emissora de elétrons, região A na Figura 1, a uma pequena área na ponta do eletrodo, aumentando a densidade da corrente. Ao concentrar o arco em uma área menor, todas as propriedades do plasma são elevadas: a temperatura, a pressão e a velocidade, além da estabilidade do arco. A Figura 12 representa uma adaptação do esquema utilizado pelos desenvolvedores da tocha para explicar como é a constrição da mancha catódica.

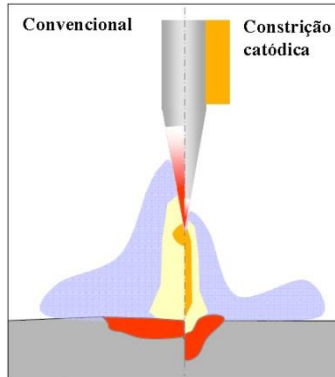


Figura 12 – Princípio da constrição do cátodo no processo de soldagem TIG.
Adaptado de Schnick et al. [1].

Segundo os trabalhos de Schnick et al. [1] e Lohse et al. [7], um sistema de refrigeração focado no cátodo diminui consideravelmente a temperatura durante o tempo de arco aberto, promovendo o aumento do campo elétrico e a transferência de cargas, a fim de garantir a conservação da corrente elétrica. Schnick [1] menciona que os íons são recombinados na ponta da superfície do cátodo, causando um forte aquecimento. Além, a taxa íon/elétrons da qual depende a temperatura do cátodo aumenta, favorecendo o resfriamento por emissão de elétrons. Este comportamento de equilíbrio (íon/elétrons) é chamado Efeito Nottingham.

O sistema de refrigeração diferenciado da tocha Infocus é representado na Figura 13, mostrando como o líquido refrigerador entra em contato com o corpo da tocha e, por sua vez com o eletrodo de tungstênio. Além disso, é possível notar as dimensões internas que influenciam a capacidade de refrigeração da tocha.

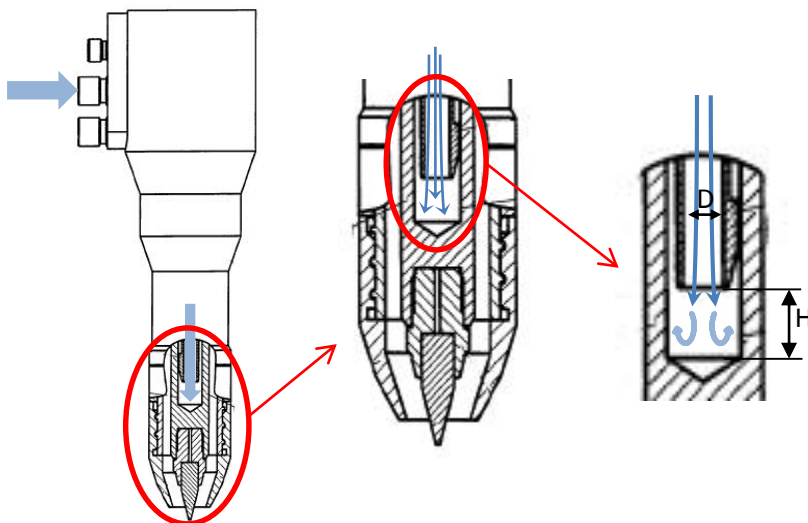


Figura 13 – Tocha TIG Infocus e as dimensões que influenciam o seu funcionamento. Adaptado da Patente Infocus [16].

O princípio de funcionamento da tocha é focado no aumento da transferência do calor por convecção, entre o fluido refrigerador e as paredes internas de cobre da tocha. Na Figura 14 e na Figura 15 é possível perceber a relevância que possui a geometria interna da Infocus, no que diz respeito ao resfriamento do eletrodo, permitindo concluir que quanto maior for a entrada da água na tocha, maior será o resfriamento proporcionado ao eletrodo. Esse fato ocorre devido ao incremento no número de Reynolds, que é usado para estabelecer o regime de escoamento de um fluido sobre uma superfície. Ao elevar-se o Reynolds se aumenta o número de Nusselt, o que permite determinar o coeficiente de transferência de calor por convecção, portanto, quanto maior for o número de Nusselt mais eficaz será a transferência de calor.

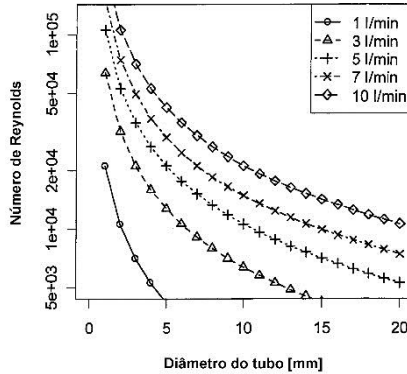


Figura 14 – Relação entre o diâmetro do tubo D da tocha Infocus com o número de Reynolds usando água como líquido refrigerador. Adaptado da Patente da Infocus [16].

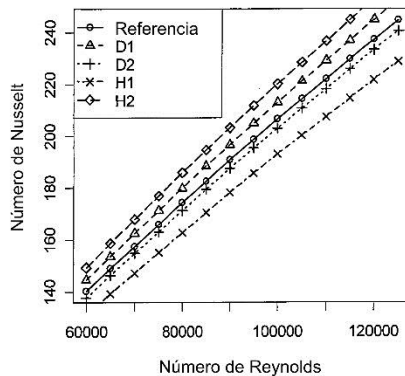


Figura 15 – Relação entre o número de Reynolds e o número de Nusselt para diferentes geometrias internas da tocha Infocus usando água como líquido refrigerador. Adaptado da Patente da Infocus [16].

Um fator importante sobre a tocha é o eletrodo utilizado, na Figura 16 é mostrado o eletrodo de tungstênio com 1,5% de lantânio da Infocus. É interessante informar que ele é vendido afiado e pronto para ser utilizado, facilitando a tarefa de troca de eletrodo. O seu tamanho é bastante reduzido e observa-se que tem bastante área de contato com a peça de cobre, elevando ao máximo a troca de calor entre eles. Além disso, possui um ângulo de afiação de 30° e um truncamento na ponta de

0,6 mm. A peça de cobre onde ele está inserido é rosqueada para facilitar a troca de eletrodo.

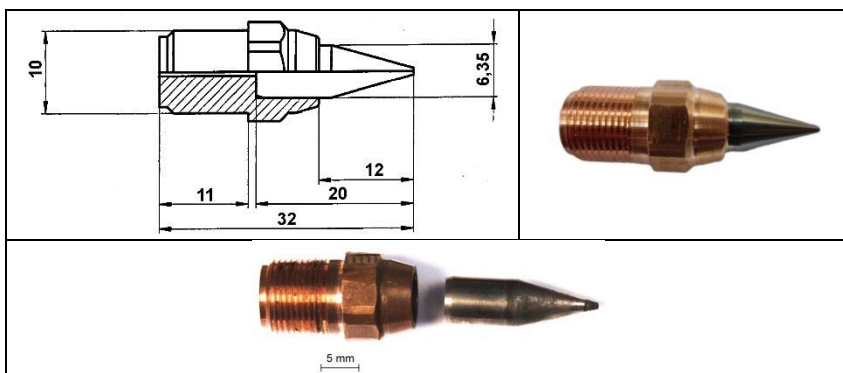


Figura 16 – Eletrodo da tocha Infocus.

Uma vez utilizado, o eletrodo da Infocus não pode ser reafiado, só existe um modelo fabricado, e ele só pode ser adquirido na Alemanha (Figura 16). Por outro lado, a grande capacidade de resfriamento da tocha, permite um aumento considerável na vida do eletrodo [1], permitindo que a Infocus trabalhe com uma corrente de até 1000 A.

Simulações numéricas feitas por Schnick et al. [1] (Figura 17) demonstram como acontece uma constrição no cátodo ao comparar a tocha Infocus com uma convencional TIG, conseguindo uma temperatura maior no centro do arco e um eletrodo mais frio. Porém, essa comparação não é correta, é fácil notar que o eletrodo da tocha convencional possui um menor diâmetro que o da Infocus, e a geometria da ponta dos eletrodos é diferente. Uma mudança no diâmetro ou na geometria da ponta do eletrodo afeta as propriedades do arco TIG como menciona o estudo desenvolvido por Jarvis [5]. Na Figura 18 se encontram as medidas de pressão e tensão do arco para as duas tochas simuladas na Figura 17, e como é de esperar, os valores foram bastante diferentes. Segundo os autores do trabalho, as diferenças nas medições se devem à constrição catódica do arco na tocha Infocus, destacadas na simulação. De fato, medições de densidade de corrente feitas por Schnick et al. [1], demonstram que a tocha Infocus consegue até 60% mais de densidade de corrente que uma tocha convencional TIG. Porém,

não foram especificados os diâmetros dos eletrodos usados naqueles ensaios.

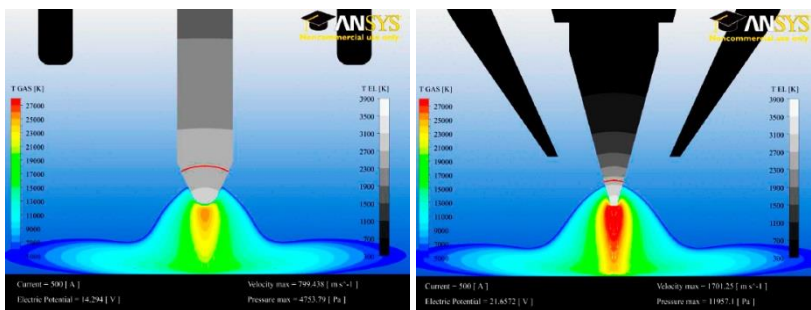


Figura 17 – Simulação numérica da temperatura do arco e o cátodo para uma tocha convencional TIG e a tocha Infocus com 500 A em Argônio. Adaptado de Schnick et al. [1].

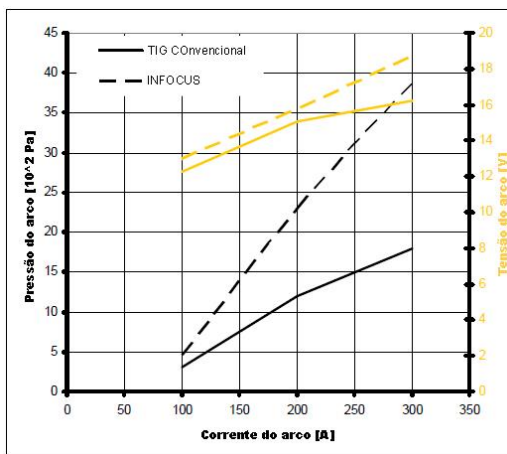


Figura 18 – Medida da pressão do arco e tensão como função da corrente para o TIG convencional e a tocha Infocus (30° ângulo da ponta do catodo, 5 mm de distância eletrodo peça, 12 l/min Ar, EWLa-1.5). Adaptado de Schnick et al. [1].

Por outro lado, a tocha TIG desenvolvida na Austrália, chamada K-TIG, baseia seu funcionamento em um excelente controle do arco através da tecnologia eletrônica da fonte de soldagem. O desenvolvedor da K-TIG, menciona que o princípio de seu funcionamento é semelhante

a uma tocha convencional, diferenciando-se somente pelo sistema de refrigeração, permitindo à tocha trabalhar com correntes de até 1000 A [5,2]. Na Figura 19 é mostrada uma tocha utilizada no desenvolvimento da K-TIG que consegue trabalhar com até 800 A, nota-se que os componentes internos da tocha não são muito diferentes de uma tocha convencional TIG, porém, a K-TIG possui um sistema adicional de resfriamento no bocal da tocha.

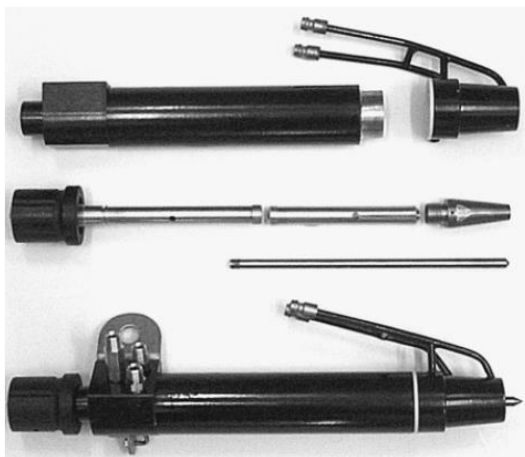


Figura 19 - Tocha TIG utilizada para o desenvolvimento da K-TIG. Adaptado de Jarvis e Ahmed [2].

O design final da K-TIG é apresentado na Figura 20, observam-se algumas modificações estéticas, operacionais e o aumento da corrente máxima de trabalho para até 1000 A, com relação à tocha mostrada na Figura 19. Deve-se ressaltar que a K-TIG possui um sistema de refrigeração superior a uma tocha convencional TIG, porém, Jarvis [5] não menciona que ocorre uma constrição catódica do arco, e sim que o arco TIG possui propriedades diferentes quando é trabalhado com correntes superiores aos 400 A.



Figura 20 – Tocha TIG de alta produtividade K-TIG. Adaptado de K-TIG [17].

As duas tochas TIG de alta produtividade, permitem trabalhar com a técnica *Keyhole*, sendo que a literatura informa que somente processos com alta concentração de energia são capazes de realizar essa técnica. De fato, mencionam que o processo TIG dificilmente conseguiria estabelecer um *Keyhole*, por falta de pressão do arco [18] [19] [20]. O *Keyhole* geralmente é realizado pelos processos de soldagem Plasma ou o LASER, porém, eles são muito caros para ser adquiridos, além de ser difíceis de implementar no campo, principalmente o processo LASER.

A técnica *Keyhole* é obtida pela pressão do arco (para alguns, pelo jato de plasma) exercida sobre a poça metálica, produzindo um furo passante de metal líquido que é fechado à medida em que a tocha avança ao longo da solda. Também se pode explicar como uma condição do processo na qual a taxa de energia imposta no material de base, excede a taxa com a qual ela é dissipada pela peça, então, o jato de plasma pode penetrar por completo a poça fundida, formando um pequeno furo característico da técnica *Keyhole*. Na Figura 21 se apresenta um esquema sobre o funcionamento da técnica *Keyhole*.

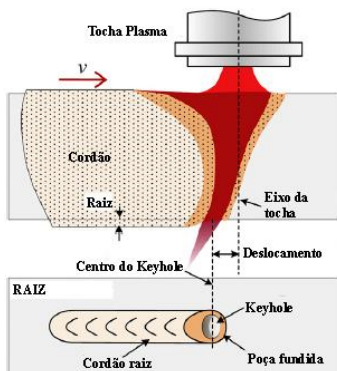


Figura 21 – Esquema do processo plasma com a técnica *Keyhole*. Adaptado de Lathabai et al. [6].

O processo TIG trabalhado em faixas de correntes convencionais (100 – 350 A) precisa de várias passadas para poder completar uma junta, enquanto que, um processo TIG trabalhando com a técnica *Keyhole* pode completar a mesma junta em uma passada só. Na Figura 22 se demonstra a comparação descrita.

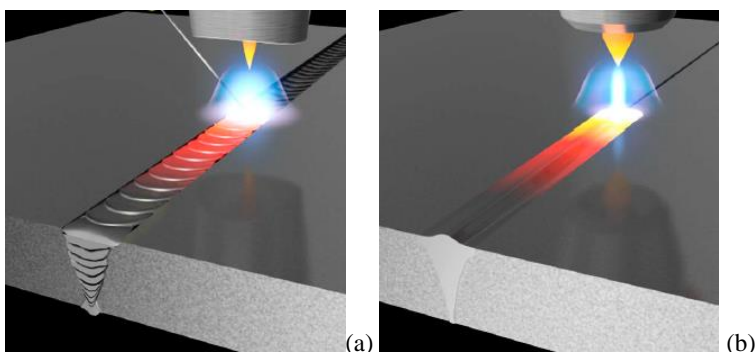


Figura 22 – Comparação entre processos TIG em união de juntas com (a) procedimento convencional (b) pela técnica *Keyhole*. Adaptado de K-TIG [17].

O princípio básico dos processos TIG e plasma é o mesmo. No caso do processo designado como plasma, o arco, formado entre um eletrodo de tungstênio e a peça, é forçado a passar por um estrangulamento. Este estrangulamento é obtido pelo denominado bico constritor. Segundo grande parte da literatura, esta constrição concentra

energia e daí surgem um sem número de conclusões de super vantagens do plasma em relação ao TIG. A literatura clássica da soldagem oferece variadas comparações entre o Plasma e o TIG, a Figura 23 apresenta uma comparação entre as condições de trabalho de cada processo, ressaltando que o Plasma não precisa estar muito perto da peça para obter uma boa penetração, ficando evidente a superioridade do plasma frente ao TIG. Além disso, é possível ressaltar que o arco no processo Plasma é ilustrado praticamente como uma coluna rígida, concentrando toda a energia do arco em uma pequena área da peça, diferentemente do TIG, que tem uma forma de cone obtendo uma pequena penetração.

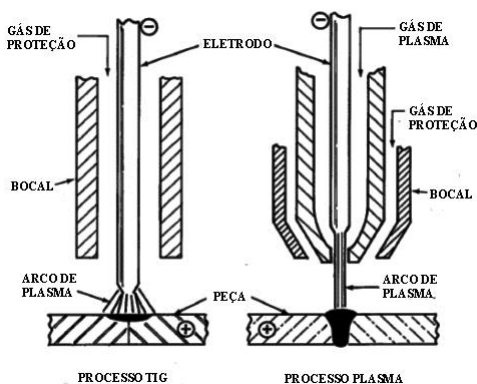


Figura 23 – Comparação Plasma-TIG em condições de trabalho normal.
Adaptado do *Welding Handbook* [18].

O *Welding Handbook* [18] menciona que o processo Plasma tem uma maior capacidade de se adaptar a diferentes distâncias entre a tocha e a peça (DTP), ou seja, a geometria da coluna do arco não tem uma mudança significativa, não havendo uma modificação na energia imposta sobre a peça. Enquanto o arco do processo TIG possui uma grande sensibilidade à variação da DTP. Porém, Silva de Paula [21] e Vergara [22] notaram que para DTP maiores que 6 mm, a coluna de plasma do arco de soldagem no processo plasma começa a adotar uma forma de cone, diminuindo consideravelmente a penetração no cordão. Na Figura 24 é possível observar os resultados obtidos por Silva de Paula [21] para diferentes DTP, onde se ressalta que os melhores resultados foram verificados para uma DTP compreendida entre 2 e 6 mm, concordando com a faixa de trabalho recomendada pelo *Welding Handbook* [18], Scotti e Reis [19] e Vergara [22]. Para uma distância

tocha peça superior a 6 mm nota-se uma intensa turbulência no *Keyhole*, agravada principalmente pela não ocorrência de penetração total e tunelamento no cordão de solda. Durante este período de instabilidade, uma parcela considerável em volume de metal fundido e constituinte da poça de fusão era lançada em direção ao bocal constritor da tocha de soldagem. Este material quando entra em contato com o bocal provocava danos ao mesmo, que praticamente era inutilizado após a operação.

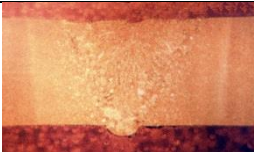




DTP 2 mm		Largura da solda: 9,7 mm Largura da raiz: 2,1 mm Reforço da raiz: 0,6 mm Largura da ZAC: 12 mm Tensão: 30 V Potencia: 6,9 kW
DTP 4 mm		Largura da solda: 9,3 mm Largura da raiz: 1,9 mm Reforço da raiz: 0,7 mm Largura da ZAC: 13 mm
DTP 6 mm		Largura da solda: 9,9 mm Largura da raiz: 1,8 mm Reforço da raiz: 0,9 mm Largura da ZAC: 14 mm
DTP 8 mm		Largura da solda: 9,1 mm Largura da raiz: - Reforço da raiz: - Largura da ZAC: 14 mm
DTP 10 mm		Largura da solda: 9,2 mm Largura da raiz: - Reforço da raiz: - Largura da ZAC: 14 mm Tensão: 35,6 V Potencia: 8,2 kW

Figura 24 – Influência da distância tocha peça (DTP) no Plasma *Keyhole* em chapas de 6,35 mm de aço carbono, argônio como gás de proteção, 3,2 mm de orifício constritor, 230 A de corrente, 19 cm/min de velocidade de soldagem e 2,4 mm de recuo do eletrodo. Adaptado de Silva de Paula [21].

A comparação entre os processos Plasma e TIG sob as mesmas condições de soldagem (Figura 25), ressalta a superioridade do plasma

frente ao TIG [18]. Além é comentada, que a maior propriedade obtida pela constrição do arco no processo Plasma é a estabilidade conseguida no *Keyhole*, o que permite uma boa adaptação a diferentes distancia eletrodo peça. Scotti e Reis [19] mencionam que o arco constrito do processo Plasma, tem uma maior resistência ao sopro magnético em comparação ao processo TIG, e que por tal motivo o processo plasma tem uma maior resistência a variações da DTP.

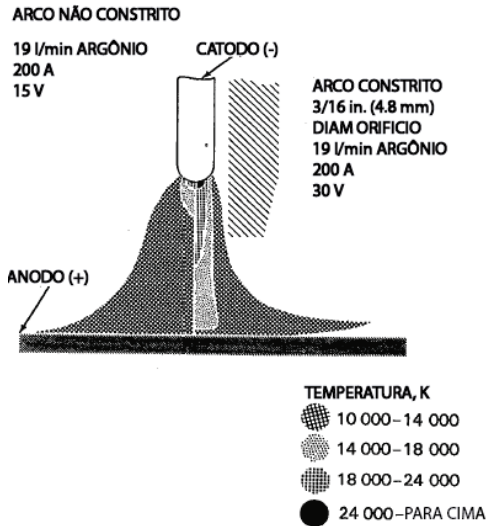


Figura 25 – Comparação Plasma-TIG sob as mesmas condições de soldagem.
 Adaptado do *Welding Handbook* [18].

Uma vantagem que é ressaltada pela bibliografia sobre o processo Plasma, é o aumento na vida do eletrodo de tungstênio, devido ao fato deste encontrar-se recuado no bocal constritor da tocha plasma, evitando que respingos provenientes da poça metálica contaminem o eletrodo. Por tal motivo, o consumível principal de uma tocha plasma é o bocal constritor, que é desgastado por estar em contato direto com o arco plasma, provocando alteração na geometria do furo constritor a cada junta feita, até chegar ao ponto de ser trocado. Além disso, como o eletrodo de tungstênio encontra-se recuado, demora mais tempo para ser trocado e posicionado novamente.

Segundo o exposto anteriormente, e respaldado pela bibliografia atual, o processo de soldagem Plasma é considerado mais produtivo e robusto que o TIG. Porém, os novos desenvolvimentos feitos por Schnick et al. [1] e Jarvis [5] estão mudando os conceitos estabelecidos para o processo TIG e suas aplicações.

3.METODOLOGIA

3.1.EQUIPAMENTO

A bancada utilizada para realizar os ensaios é mostrada na Figura 26, e esta composta pelos equipamentos descritos na Tabela 3.



Figura 26 – Bancada de ensaios.

Tabela 3 – Descrição dos equipamentos utilizados.

	Equipamento	Descrição
1	Tartilope V2	Sistema de movimentação automática em dois eixos para aplicação em processos de soldagem e corte de chapas metálicas. Tem uma velocidade de soldagem máxima de até 300 cm/min.
2	Fonte de soldagem IMC DIGITEC 800	- Faixa de corrente 10 – 800 A - Corrente a 100% de fator de carga: 500 A - Potência nominal 16 kVA
3	Unidade de refrigeração AKESA	Unidade de refrigeração adaptada para resfriamento de tochas de soldagem, com a possibilidade de controle da temperatura de resfriamento de até 10°C.
4	Gás de proteção	No trabalho foram usados os gases Argônio puro e a mistura Ar+5%H.
5	SAP 4.0	Sistema de aquisição de dados utilizado para medição dos sinais elétricos do processo de soldagem. Taxa de aquisição 5 kHz.

As tochas de soldagem utilizadas para os estudos são descritas na sequência com suas devidas condições de trabalho.

3.1.1. Tocha Infocus

A tocha Infocus apresentada na Figura 27, foi utilizada com uma vazão de água deionizada de refrigeração de 8,4 l/min, e um eletrodo TIG EWL-1.5 de 6,35 mm, como foi apresentado no marco teórico na Figura 16. Tocha capaz de trabalhar com até 1000 A de corrente.



Figura 27 – Tocha Infocus.

3.1.2. Tocha TIG 27B BINZEL ABICOR

Tocha TIG convencional é capaz de trabalhar com até 500 A e com todos os diâmetros de eletrodos disponíveis no mercado, mostrada na Figura 28.



Figura 28 – Tocha TIG 27B Binzel Abicor.

O sistema de resfriamento interno da tocha é exibido na Figura 29, nota-se que ele é relativamente simples e pouco eficiente. O líquido refrigerador utilizado foi água desionizada. Durante os ensaios a

temperatura da água de resfriamento foi mantida em 20° C. Com vazão de refrigeração foi de 8,4 l/min.

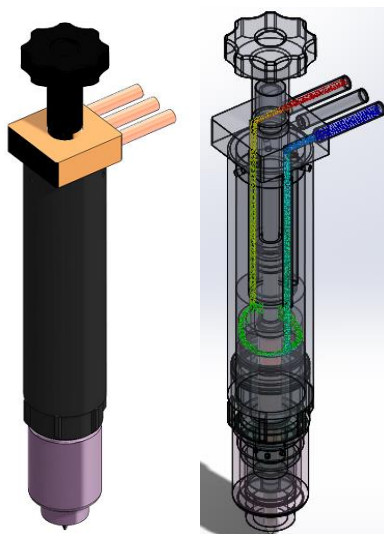


Figura 29 – Sistema de resfriamento da tocha TIG 27B Binzel Abicor.

3.1.3. Eletrodos de tungstênio

Nos estudos feitos por Matsuda et al. [4], Sadek et al. [3] e Ushio et al. [12] se percebe que a melhor liga para utilizar como eletrodo TIG em relação a qualidade, propriedades da solda e preço no mercado, é o tungstênio com adição de lantânio. Entretanto na América do Sul o eletrodo com tório ainda é o mais popular, porém, a *American Welding Society* (AWS) em sua norma A5.12 declara que “o tório é radioativo e pode apresentar perigos com a sua exposição externa e interna ao corpo humano. Se existe alguma alternativa tecnicamente viável, ela deveria ser usada”. A AWS e associações similares de outros países, como a TWI (*The Welding Institute*) da Inglaterra e a DVS (*German Welding Society*) da Alemanha, concordam em que o principal perigo é durante a afiação da ponta do eletrodo, pois é gerado um pó radioativo com risco de absorção pelo indivíduo. Sendo assim, é necessário usar um exaustor local para controlar o pó que sai do afiador e, se necessário complementando com um equipamento de proteção respiratória.

Eletródos de tungstênio com adição de óxidos não radiativos como o cério e o lantânio, fornecem as mesmas propriedades, senão melhores que o tório. Uma possível razão de porque ainda é utilizado o eletrodo como o tório, é a falta de conhecimento de sua nocividade para a saúde, e pela diferença de preço que existe entre as ligas. O preço médio no mercado de um eletrodo de 6,35 mm de diâmetro com 2% de tório é USD\$ 259,75 (pacote de 10 unidades), enquanto o valor médio do eletrodo com 1,5% de Lantânio é USD\$ 298,44 (pacote de 10 unidades) [23], preços que para projetos de grandes proporções podem ser significativos.

No presente trabalho foram usados eletrodos EWTh-2 (98% W – 2% ThO₂) e EWLa-1.5 (98,5% W – 1,5% La₂O₃) classificados segundo a norma AWS A5.12, de diâmetro 6,35 mm (1/4 in), para evidenciar a influência da composição do eletrodo sobre a mancha catódica.

3.1.4. Imagens

Para a produção das filmagens do arco de soldagem foi necessário uma bancada fixa onde o material de base pudesse ser deslocado. A Figura 30 apresenta a bancada montada.

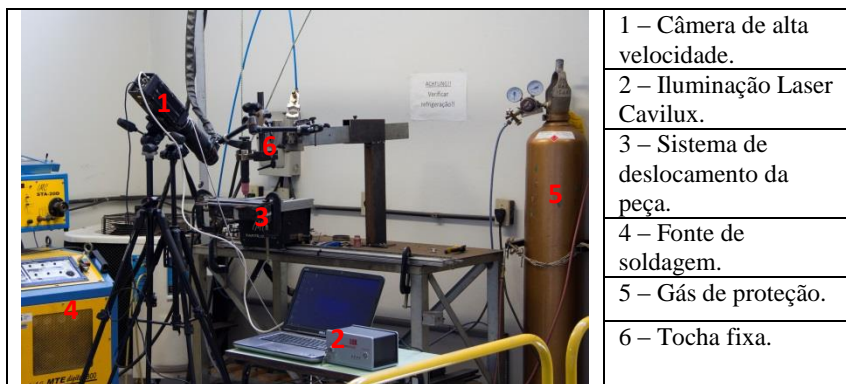


Figura 30 – Bancada de filmagem do arco de soldagem.

Foram utilizadas duas câmeras uma para cada tipo de estudo. No caso do estudo do desgaste do eletrodo e da mancha catódica foram utilizados os equipamentos descritos na Tabela 4. Enquanto para o

estudo da dinâmica do *Keyhole* foram usados os materiais relatados na Tabela 5.

Tabela 4 – Equipamentos para a captura de imagens e filmagem do desgaste e mancha catódica do arco de soldagem.

Parâmetro	
Câmera	Canon 60D
Lente	Canon EF 180mm f/3.5 L Macro USM
Frame Rate	29,97
Tempo de exposição	1/4000 s
Abertura da lente	F20
ISSO	200
Filtro	<ul style="list-style-type: none"> • Canon Neutral Density ND8 • Canon UV • Canon Circular PL

Tabela 5 – Equipamentos para a captação de imagens e filmagem da dinâmica do *Keyhole*.

Parâmetro	
Câmera de alta velocidade	IDT Y4-S2 – 10.100 FPS at Maximum Resolution (1024x1024)
Lente	Canon EF 180mm f/3.5 L Macro USM
Frame Rate	2857
Tempo de exposição	7 μ s
Apertura da lente	F20
Iluminação	Cavilux HF pulsed diodo Laser
Filtro	<ul style="list-style-type: none"> • Canon Neutral Density ND8 • Canon UV • Canon Circular PL

No caso das filmagens termográficas foi utilizada a Câmera da Flir modelo SC7200-MB. Não foram usados filtros ou configurações especiais na câmera.

3.1.5. Material base

Utilizou-se o processo de corte por plasma para dimensionar o material. Os corpos de prova de aço carbono SAE 1020 foram constituídos de duas chapas de 100x300x6,35 mm. Na superfície em ambos os lados da junta foi efetuado um lixamento prévio para remoção

da carepa de laminação que se forma sobre o material. As chapas foram ponteadas em cada uma das extremidades para formar a junta. Na Figura 31 se observa a aparência final da superficial da junta.

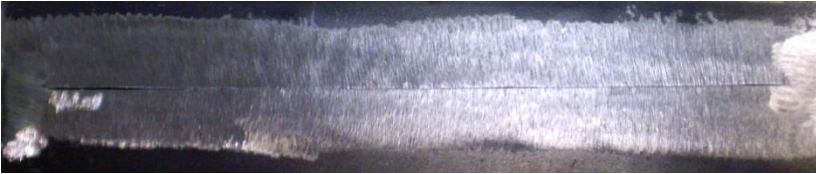


Figura 31 – Aparência superficial da junta.

3.2. ESTUDOS

Na sequência se descreve as condições específicas nas quais foram desenvolvidos cada um dos estudos realizados nesse trabalho. Para garantir que os resultados não foram casualidades circunstanciais, os ensaios foram repetidos três vezes. Portanto, cada variável analisada no trabalho é a média das medições feitas.

3.2.1. Efeito da temperatura de refrigeração da tocha sobre o comportamento do arco

Para realizar o estudo da influência da temperatura sobre o eletrodo da tocha Infocus, a unidade de refrigeração foi programada para trabalhar com três temperaturas 15°, 20° e 38° C. Para cada modificação foram feitos ensaios usando os parâmetros da Tabela 6, para a obtenção de dados de corrente e tensão.

Tabela 6 – Parâmetros de soldagem.

Parâmetro	
Eletrodos Ø 6,35mm	<ul style="list-style-type: none"> • EWTh-2 • EWLa-1.5 • EWLa-1.5 (Infocus)
Corrente [A]	- 100 - 400 - 200 - 500 - 300
DEP	5 mm
Velocidade de soldagem	35 cm/min
Ângulo de afiação do eletrodo	30°
Truncamento da ponta do eletrodo	0,6 mm
Gás de proteção	Ar
Vazão de gás de proteção	18 l/min
Material de base	Aço SAE 1020
Espessura do material de base	6,35 mm

A temperatura de refrigeração foi assegurada através de um termômetro de mercúrio, mantido até a temperatura se estabilizar. O comprimento de cada cordão foi de 27 cm.

Na Figura 32 se observa o ponto de medição da tensão em cada uma das tochas utilizadas. Os ensaios foram feitos sobre chapas de aço SAE 1020 na posição plana.

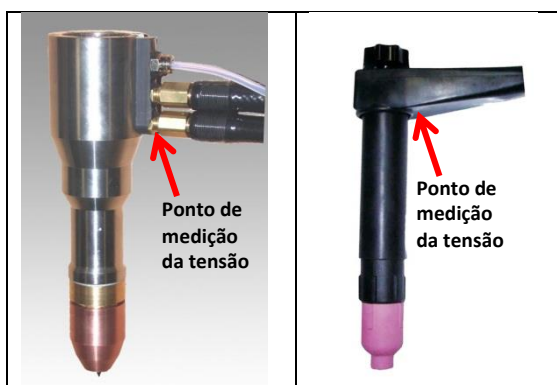


Figura 32 – Pontos de medição da tensão do arco de soldagem.

3.2.2. Desgaste do eletrodo

Para analisar visualmente o desgaste do eletrodo da tocha Infocus em comparação a um eletrodo convencional TIG, foram realizados ensaios nas condições de soldagem apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Condições utilizadas para o desgaste do eletrodo

Parâmetro	
Eletrodos Ø 6,35mm	<ul style="list-style-type: none"> • EWTh-2 • EWLa-1.5 (Infocus)
Corrente	100 A
DEP	5 mm
Ângulo de afiação do eletrodo	30°
Truncamento da ponta	0,6 mm
Tempo de arco aberto	30 min
Gás de proteção	Ar+5%H - 18 l/min
Pre-gás de proteção	4 s
Pós-gás de proteção	4 s
Material de base	Base de cobre resfriada com água

3.2.3. TIG *Keyhole*

O *Keyhole* no processo TIG foi dividido segundo o estudo das seguintes variáveis: velocidade de soldagem, distância eletrodo peça e adição de material. Os parâmetros do arco de soldagem para formar um *Keyhole* estável foram os mesmos para todos os estudos, e são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros utilizados nos ensaios do estudo do *Keyhole*.

Parâmetro	
Eletrodos Ø 6,35mm	<ul style="list-style-type: none"> • EWTh -2 • EWLa-1.5 • EWLa-1.5 (Infocus)
Corrente	520 A
DEP	3 mm
Velocidade de soldagem	<ul style="list-style-type: none"> • 55 cm/min (Ar+5%H) • 40 cm/min (Ar)
Ângulo de afiação do eletrodo	30°
Truncamento da ponta do eletrodo	0,6 mm

Gás de proteção	<ul style="list-style-type: none"> • Ar+5%H • Ar
Vazão de gás de proteção	18 l/min
Gás de Purga	Ar
Vazão de gás de purga	8 l/min
Material de base	Aço SAE 1020
Espessura do material de base	6,35 mm

Os ensaios foram repetidos três vezes por eletrodo, obtendo-se três corpos de prova, além de fazer as medições de geometria do cordão, para obter uma média de cada parâmetro geométrico.

Devido à instabilidade que apresenta a poça fundida da raiz em contato com o oxigênio, se utiliza o sistema de gás de purga da Figura 33, para garantir a estabilidade do *Keyhole*. O gás de purga utilizado foi Argônio.

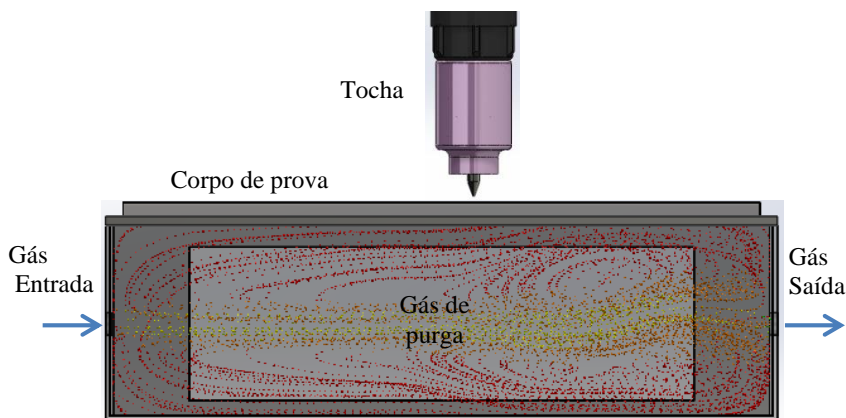


Figura 33 – Sistema desenvolvido para aplicar o gás de purga.

Devido à grande importância dos parâmetros de início e do término do *Keyhole* para a sua estabilidade [22], foram programadas rampas de início e final para a velocidade de soldagem e a corrente do arco (Figura 34). Enquanto na Tabela 9 são apresentados os valores dos tempos utilizados para cada rampa.

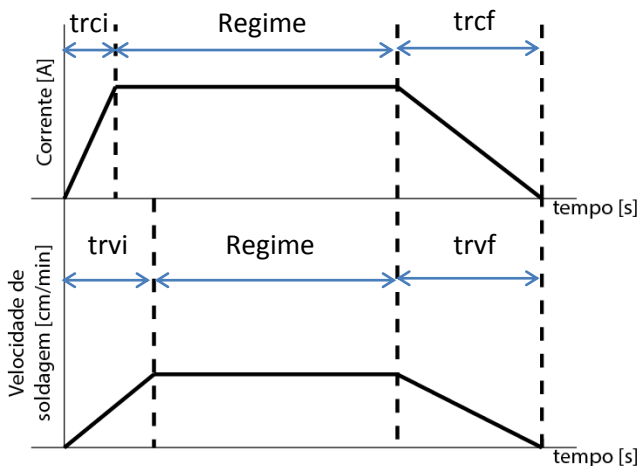


Figura 34 – Rampas de início e término no processo TIG *Keyhole*.

Tabela 9 - Tempos das rampas de início e término usados nos ensaios com TIG *Keyhole*.

Parâmetro	Valor [s]
trci	1
trcf	2
trvi	3
trvf	4

3.2.3.1 *Keyhole* com adição de material

Para realizar os ensaios com adição de material foi utilizado um direcionador de arame desenvolvido no LABSOLDA, que é apresentado na Figura 35. Os parâmetros e materiais utilizados são descritos na Tabela 10.

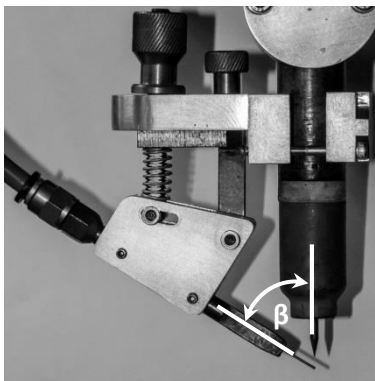


Figura 35 – Direcionador de arame desenvolvido no LABSOLDA.

Tabela 10 - Parâmetros utilizados nos ensaios do *Keyhole* com adição de material.

Parâmetro	
Eletrodo	EWTh-2 - Ø 6,35mm
Corrente	520 A
DEP	3 mm
Velocidade de soldagem	55 cm/min
Ângulo de afiação do eletrodo	30°
Truncamento da ponta do eletrodo	0,6 mm
Gás de proteção	Ar+5%H
Vazão de gás de proteção	18 l/min
Gás de purga	Ar
Vazão de gás de purga	8 l/min
Material de base	Aço SAE 1020
Espessura do material de base	6,35 mm
Material de adição	ER70S-6 - Ø1,2mm
Ângulo β entre arame e o eletrodo	30°
Velocidade de arame [m/min]	<ul style="list-style-type: none"> • 2,5 • 3,5 • 4,5

3.2.3.2 Efeito da velocidade de soldagem no *Keyhole*

Para realizar o estudo foram utilizadas as tochas TIG convencional e a Infocus, com os parâmetros descritos na Tabela 11 segundo as condições da Tabela 12.

Tabela 11 – Velocidades de soldagem estudadas.

Gás de proteção	Velocidade de soldagem [cm/min]
Argônio	- 35 - 45 - 40 - 50
Ar+5%H	- 55 - 65 - 60

Tabela 12 – Condições para o estudo da velocidade de soldagem no *Keyhole*.

Parâmetro	
Eletrodo - Ø 6,35mm	- EWTh-2 - EWLa-1.5 (Infocus)
Corrente	520 A
DEP	3 mm
Ângulo de afiação do eletrodo	30°
Truncamento da ponta do eletrodo	0,6 mm
Vazão de gás de proteção	18 l/min
Gás de purga	Ar
Vazão de gás de purga	8 l/min
Material de base	Aço SAE 1020
Espessura do material de base	6,35 mm

3.2.3.3 Distância eletrodo peça (DEP)

O estudo da DEP foi realizado segundo o plano de ensaios apresentado na Tabela 13 e as condições de trabalho da Tabela 14.

Tabela 13 – Plano de ensaio para o estudo da DEP.

Gás de proteção	Distância eletrodo peça (DEP)
Argônio	- 1 mm - 5 mm - 2 mm - 6 mm - 3 mm - 8 mm - 4 mm
Ar+5%H	- 1 mm - 5 mm - 3 mm - 8 mm

Tabela 14 – Condições para os ensaios da DEP.

Parâmetro	
Eletrodo	EWTh-2 Ø 6,35mm
Corrente	520 A
Ângulo de afiação do eletrodo	30°
Truncamento da ponta do eletrodo	0,6 mm
Velocidade de soldagem	- 40 cm/min (Ar) - 55 cm/min (Ar+5%H)
Vazão de gás de proteção	18 l/min
Gás de purga	Ar
Vazão de gás de purga	8 l/min
Material de base	Aço SAE 1020
Espessura do material de base	6,35 mm

4.RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1.EFEITO DA TEMPERATURA DE REFRIGERAÇÃO DA TOCHA SOBRE O COMPORTAMENTO DO ARCO

Um questionamento colocado pelos fabricantes da tocha Infocus, é a influência de uma refrigeração focalizada no eletrodo de tungstênio sobre as zonas do arco de soldagem. Para testar esse efeito, foram realizados ensaios conforme descrito no item 3.2.1 do trabalho, com isso, foi evidenciado que para temperaturas da água de refrigeração inferiores a 15° C a umidade do ambiente começa a condensar na ponta do eletrodo da tocha Infocus (Figura 36).

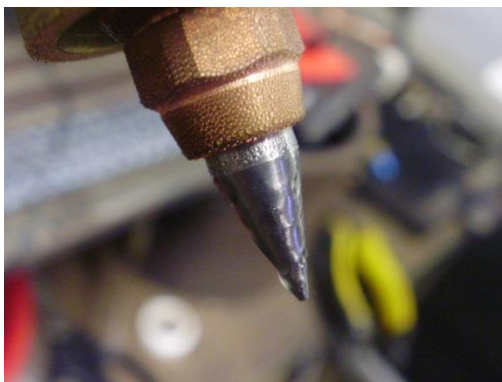


Figura 36 – Ponta do eletrodo com temperatura de refrigeração inferior a 15° C.

A Figura 37 apresenta as curvas corrente-tensão da tocha Infocus para diferentes temperaturas de refrigeração, mostrando que para correntes inferiores a 400 A existe uma influência sobre a tensão do arco. Enquanto para correntes maiores a 400 A, o valor da tensão apresenta variações pouco significativas para qualquer temperatura do líquido refrigerador da tocha. É preciso lembrar que a temperatura do cátodo é um fator importante na emissão termiônica, além de influenciar diretamente nas características do arco.

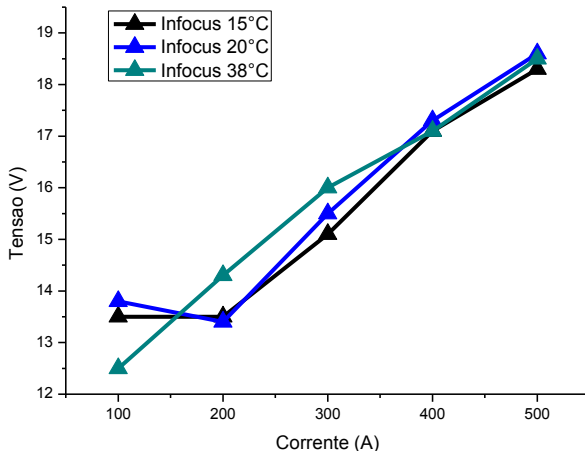


Figura 37 – Curvas de corrente e tensão para diferentes temperaturas de refrigeração da tocha Infocus.

O comportamento da tensão do arco frente a diferentes temperaturas do líquido refrigerador, evidenciado na Figura 37, demonstra a relevância que possui a temperatura do cátodo sobre o comportamento do arco. Para uma corrente de 100 A um cátodo a 38° C precisa de uma menor tensão, além de conseguir uma abertura mais fácil do arco. Enquanto para correntes maiores, o eletrodo a 38° C precisa de uma maior tensão. Porém, o verdadeiro mérito da Infocus não é obter uma a temperatura mais baixa do cátodo ao momento de estabelecer um arco de soldagem, e sim, de manter a temperatura baixa e estável durante o período de arco aberto. Para comprovar o anteriormente dito, imagens termográficas foram feitas para as tochas Infocus e Convencional, segundo as condições estabelecidas no item 3.1.4. Os resultados das imagens termográficas, Figura 38, demonstram que a tocha Infocus consegue manter uma temperatura menor que uma tocha convencional. De fato, na Figura 39 é possível observar a curva temperatura-tempo, notando que a curva de resfriamento da Infocus é uma linha reta fixa a 30° C.

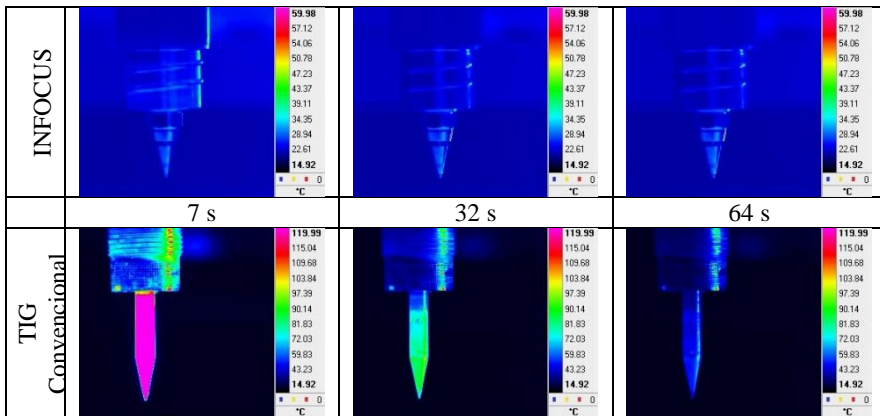


Figura 38 - Imagens termográficas obtidas após de fazer uma junta de 27 cm com 520 A de corrente para as duas tochas estudadas.

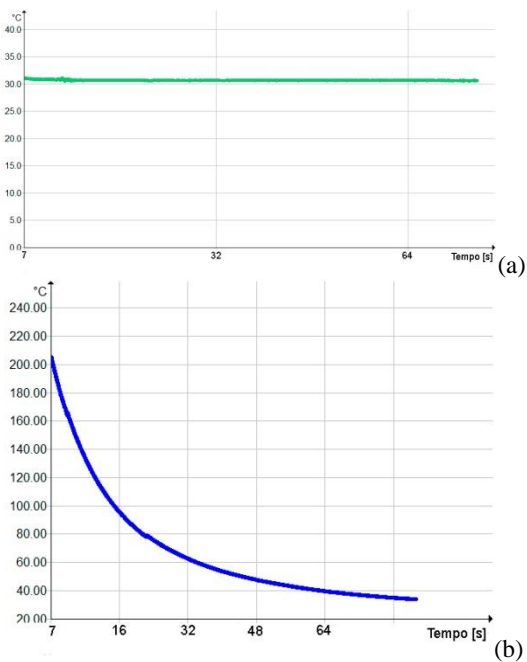


Figura 39 - Curvas temperatura-tempo após se fazer uma junta de 27 cm com 520 A de corrente para (a) Infocus (b) TIG convencional.

Imagens adquiridas durante períodos de arco aberto para as tochas Infocus (EWLa-1.5) e a convencional (EWTh-2), são apresentadas na Figura 40, podendo assim observar de maneira indireta a temperatura das pontas dos eletrodos, respaldando o obtido pelos ensaios termográficos na Figura 38 e demonstrando que efetivamente o eletrodo da tocha Infocus é mais frio, exercendo uma influência sobre o comportamento do arco.

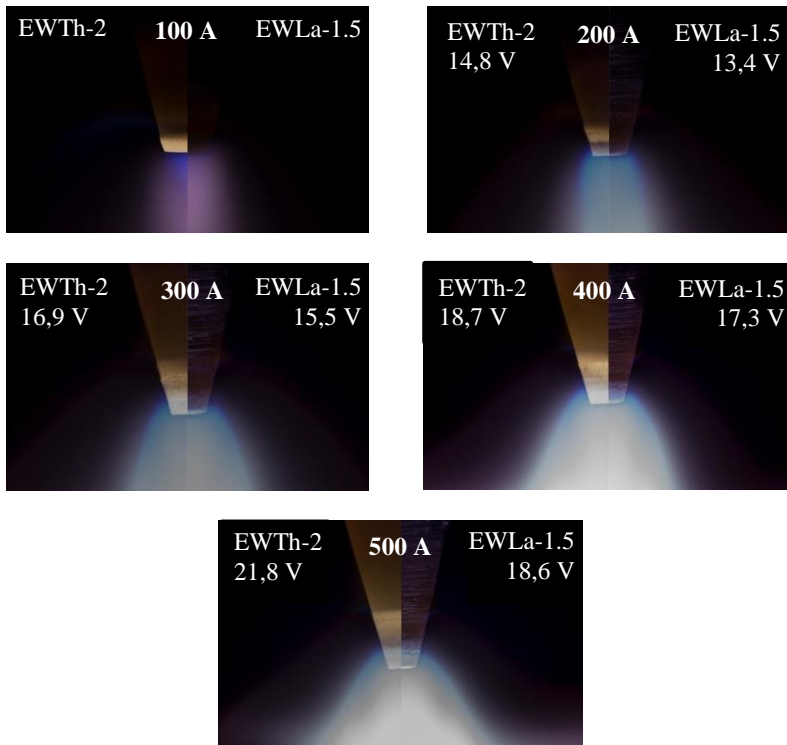


Figura 40 - Comparação entre os eletrodos de tungstênio com conteúdo de lantânio e tório.

Uma comparação entre as curvas da Figura 37 e a tocha convencional TIG com eletrodos de tungstênio com 2% de tório e 1,5% de lantânio, são apresentados na Figura 41. A diferença que existe entre a tocha TIG com o eletrodo EWTh-2 e a Infocus é significativa, na medida que se aumenta a corrente. Enquanto o eletrodo EWLa-1.5,

possui um comportamento corrente-tensão similar à Infocus refrigerada a 38° C.

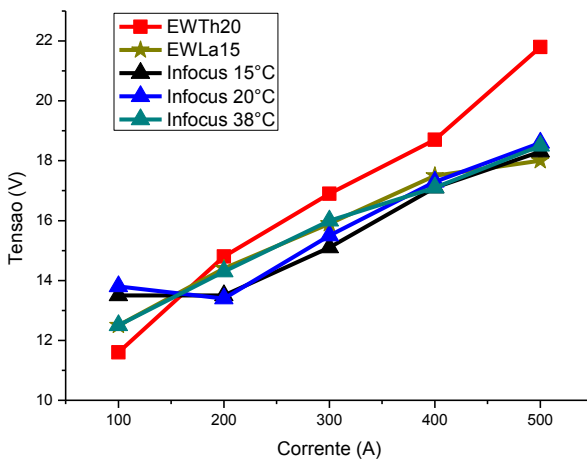


Figura 41 – Comparação das curvas corrente-tensão das tochas Infocus e Convencional para diferentes composições de eletrodos de tungstênio de 6,35 mm de diâmetro.

A Figura 42 apresenta a curva corrente-tensão obtida por Schnick et al. [1] ao comparar a tocha Infocus e uma tocha convencional TIG, demonstrando que a Infocus precisa de uma maior tensão que uma tocha convencional, o qual segundo Schnick et al. [1], é devido à constrição catódica do arco. Além disso, para correntes maiores a 200 A é possível notar que a tensão requerida pela Infocus é maior.

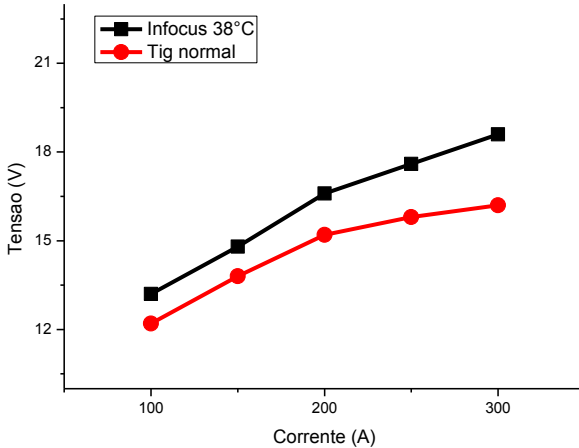


Figura 42 – Comparação das curvas corrente-tensão entre uma tocha convencional TIG e a Infocus. Adaptado de Schnick et al. [1].

Comparando a Figura 42 com a Figura 41 percebe-se que o comportamento das curvas, e, portanto, das tochas, são totalmente diferentes do descrito por Schnick et al. [1], embora o eletrodo utilizado na Figura 41 fosse de uma composição diferente ao utilizado pela Infocus. Por outro lado, também foi percebido que um eletrodo convencional TIG EWLa-1.5, consegue um comportamento similar de tensão-corrente que a tocha Infocus, sem trabalhar com um sistema de resfriamento especial. Enquanto o comportamento corrente-tensão observado no eletrodo de EWTh-2, se deve à ação da deformação que a ponta do eletrodo sofre pela temperatura do arco elétrico, além da influência que possui a função trabalho sobre o comportamento da mancha catódica. Por tal motivo, o resfriamento centrado no eletrodo oferecido pela tocha Infocus não é o causante do comportamento diferenciado da tensão do arco, e segundo o exposto no trabalho de Matsuda et al. [11], o conteúdo de lantânio nos eletrodos de tungstênio provocam uma maior densidade de corrente que qualquer outra liga de eletrodo, além de afetar o comportamento da tensão do arco voltaico.

Na comparação feita na Figura 40 observa-se que na medida em que se incrementa a corrente, a superfície da mancha catódica aumenta, sendo maior no caso do eletrodo EWTh-2, possuindo portanto, uma menor densidade de corrente.

Para corroborar o descrito por Matsuda et al. [11] sobre a maior densidade de corrente no eletrodo de lantânio foi utilizada a técnica de medição de área de emissão de elétrons descrita por Sadek et al. [3] e Savage et al. [24]. Na Figura 43 são apresentadas as medições das áreas de emissão de elétrons para os eletrodos da tocha Infocus (EWLa-1.5) e Binzel (EWTh-2), para um arco de soldagem de 400 A. Concluindo-se que o eletrodo da Infocus possui uma maior densidade de corrente, portanto, é possível considerar que existe uma constrição catódica.



Figura 43 – Medição das áreas de emissão de elétrons e estimativa da densidade de corrente para um arco de soldagem de 400 A e temperatura de resfriamento da tocha de 15° C.

Das análises feitas sobre os ensaios realizados, fica evidente que o conteúdo de óxido de lantânio no eletrodo TIG é o principal agente no aumento das propriedades do arco de soldagem, e não a constrição catódica do arco da Infocus. Utilizar temperaturas de refrigeração da tocha Infocus inferiores a 30° C diminuem a tensão do arco, porém, a energia utilizada para manter a temperatura da água a 15° C talvez não seja o mais vantajoso. Por outro lado, para correntes superiores a 400 A, temperaturas de refrigeração inferiores a 30° C não exercem uma influência significativa sobre o comportamento do arco.

4.2. DESGASTE DOS ELETRODOS

Segundo o descrito por Schnick et al. [1] e na patente da tocha Infocus [16], o sistema de refrigeração centrado no eletrodo consegue elevar a produtividade do processo TIG, através da redução no desgaste, promovida pela baixa temperatura conseguida em comparação a um eletrodo convencional TIG. Para comprovar essas descrições, foram utilizadas as medições de temperatura dos eletrodos da tocha Infocus e a tocha Binzel, apresentadas na Figura 38, demonstrando que efetivamente a tocha Infocus possui uma maior capacidade de resfriamento, com eletrodo alcançando uma temperatura constante de aproximadamente 30° C, aos 7 segundos depois de encerrar o arco de soldagem. Enquanto o eletrodo (EWTh-2) da tocha convencional, aos 7 segundos possui uma temperatura de 210° C aproximadamente, conseguindo chegar aos 30° C depois de 1 minuto.

A diferença de temperatura entre os eletrodos de lantânio e tório deve-se aos diferentes valores de emissividade dos óxidos. Segundo as medições de emissividades com arco aberto feitas por Ushio et al. [12], o eletrodo com 2% de tório possui uma emissividade de 0,18, enquanto o eletrodo com conteúdo de lantânio tem uma emissividade de 0,30. Lembrando que a emissividade é a capacidade de emissão de energia por radiação de uma superfície, é possível dizer que o eletrodo com lantânio tem uma maior capacidade para dissipar energia, em comparação ao tório, e por tanto consegue uma menor temperatura na superfície.

Por outro lado, a rapidez no resfriamento do eletrodo no momento de desligar o arco, tem uma influência significativa sobre a superfície da ponta do eletrodo e sobre o tempo de pós-gás de proteção necessário. Na Figura 44 é possível apreciar uma comparação entre as superfícies de diferentes eletrodos TIG, durante o arco ligado e depois dele, notando-se que com arco de soldagem ligado a temperatura do eletrodo da tocha Infocus tem uma menor temperatura que os demais eletrodos, sendo possível observar as marcas deixadas pela afiação da ponta. Além disso, se evidencia que o eletrodo EWLa-1.5 possui uma menor temperatura que o eletrodo EWTh-2, o que vai de acordo com o exposto por Matsuda et al. [11] e Ushio et al. [12] na Tabela 2 e sustentado por Sadek et al. [3] e Fuentes [25]. Portanto, é possível dizer que a tocha Infocus incrementa a emissividade do eletrodo, que depende da temperatura da superfície.

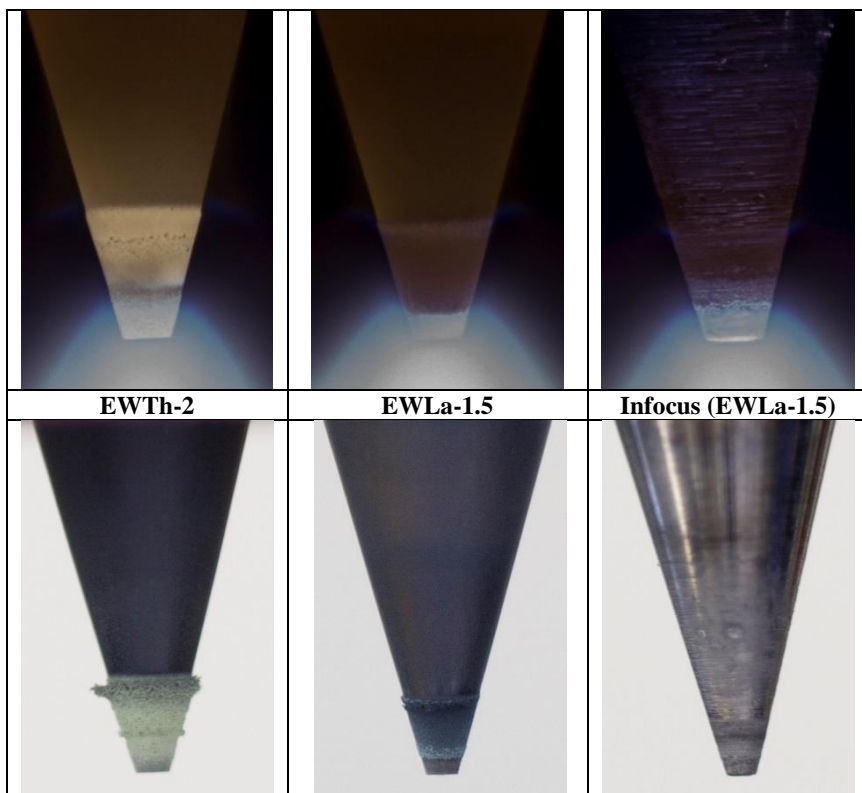


Figura 44 – Superfície da ponta dos eletrodos com arco ligado e desligado para 520 A com 4 s de pós-gás de proteção (Ar+5%H).

Na superfície resultante do eletrodo após um arco de soldagem, observa-se que o eletrodo da Infocus fica com uma boa aparência superficial, sem nenhuma coloração, indicando assim que o eletrodo está livre de óxidos na superfície. Enquanto nos eletrodos utilizados com a tocha convencional TIG, as suas superfícies ficaram com uma coloração roxa devida à sua oxidação, ela se deve à alta temperatura do eletrodo após o desligamento do arco, que reage com o oxigênio no ar. Essa oxidação pode ser diminuída ou eliminada se o tempo de pós-gás de proteção for aumentado. Porém, se o tempo é aumentado a produtividade do processo se reduz.

Na fundamentação teórica foi mencionado o trabalho de Matsuda et al. [4] sobre a influência do teor de oxigênio dentro da atmosfera do arco (Figura 8) com relação à coloração e o crescimento dendritico sobre a superfície do eletrodo. Nessa pesquisa se misturou 0,2% de oxigênio com o gás de proteção, o qual afetou a aparência superficial do eletrodo, fenômeno encontrado também na Figura 44. Além, o anel de dendritas localizado na periferia da zona catódica dos eletrodos da Figura 44, vide Figura 8, é uma das diferentes estruturas encontradas na superfície da ponta do eletrodo.

Evidentemente a estrutura da superfície do eletrodo depende da composição do mesmo. Na Figura 45 foram comparadas as geometrias dos anéis para diferentes composições de eletrodos, incluindo a tocha Infocus. Percebe-se que o resfriamento proporcionado pela Infocus tem uma influência significativa no crescimento dendritico, sobre a superfície da ponta do eletrodo, nota-se que não há formação desse anel no caso do eletrodo da Infocus. Além disso, observa-se que o eletrodo com 2% de tório possui um anel mais fino, embora ele já tenha perdido a geometria inicial da ponta.

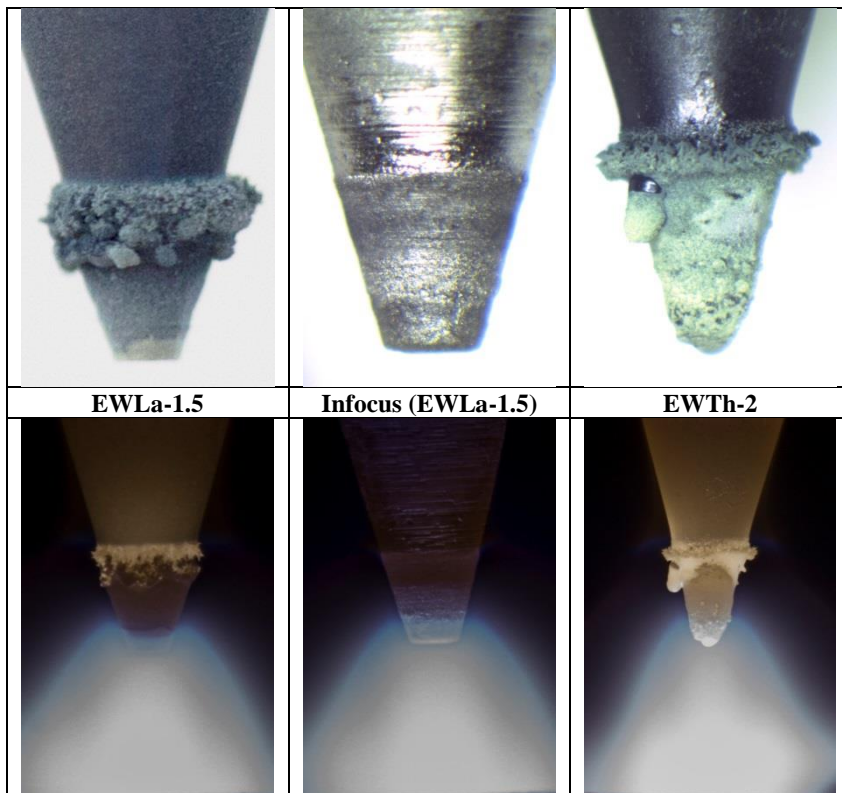


Figura 45 – Geometria na superfície de diferentes eletrodos TIG depois de 5 uniões feitas com 520 A.

O anel descrito por Matsuda et al. [15] é originado principalmente sobre a superfície do eletrodo através da oxidação do tungstênio. O tungstênio é facilmente oxidável e produz WO_3 , que pode sublimar e decompor-se a uma temperatura relativamente baixa. O vapor do óxido de tungstênio viaja através do gás de proteção, que continuamente é induzido dentro da área próxima ao arco de soldagem, e através da decomposição do WO_3 o tungstênio puro se deposita sobre a região da superfície criando as condições mais adequadas para o crescimento dendrítico. A Figura 5 ilustra o anteriormente descrito.

Para comparar o desgaste e o crescimento dendrítico que ocorre na superfície do eletrodo, entre a tocha Infocus e uma convencional

TIG, foi estabelecido um arco de 100 A durante 30 minutos, conforme a descrição no item 3.2.2, possibilitando observar, na Figura 46, o desgaste do eletrodo em diferentes momentos. Para 20 s de arco ligado já é possível notar mudanças na superfície do eletrodo com 2% de tório, e observar-se uma maior temperatura na ponta do eletrodo em comparação com a tocha Infocus. Com o passar do tempo, é possível notar que a temperatura na ponta do eletrodo se mantém no caso do eletrodo com tório, enquanto na Infocus a temperatura do eletrodo aumenta com o tempo, comprometendo a estabilidade da mancha catódica, estabilizando-se entre os 15 e os 30 min. Aos 15 minutos de arco ligado nota-se um anel perfeitamente formado para o eletrodo com tório, que não cresce depois dos 15 min, porém, começa um desgaste atrás do anel em forma de pescoço. No caso do eletrodo da tocha Infocus, não se nota a formação desse anel, mas sim, de um pescoço bem menor em comparação ao eletrodo de tório. A geometria final dos eletrodos é vista na Figura 47.

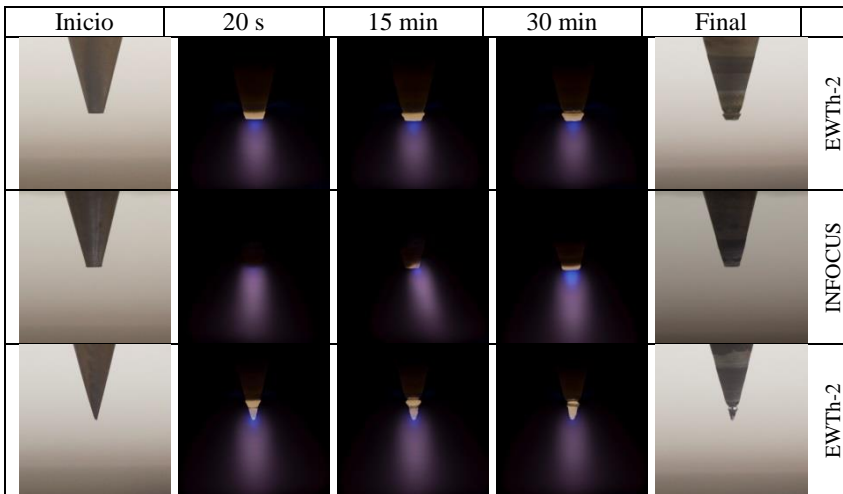


Figura 46 – Desgaste do eletrodo durante 30 minutos com um arco de 100 A e argônio como gás de proteção.

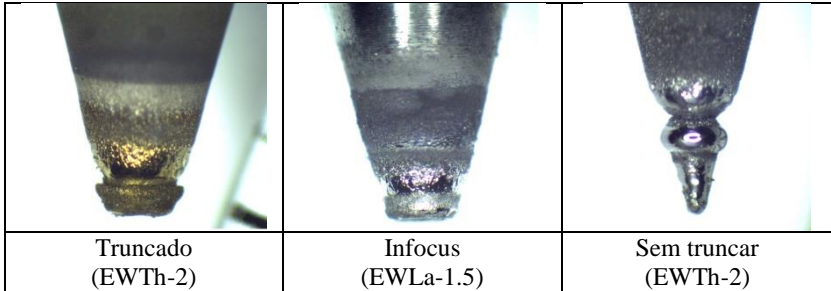


Figura 47 – Geometria da superfície do eletrodo depois de 30 minutos com um arco de 100 A ligado.

O desgaste tipo pescoço é devido ao fluxo de gás de proteção que inicialmente é laminar sobre a superfície do eletrodo, e que se altera a um fluxo turbulento detrás do anel (Figura 48). O fluxo turbulento eleva a taxa de erosão do eletrodo nessa região, causando a formação do pescoço. Também é percebido da Figura 47 que o truncamento da ponta do eletrodo ajuda na resistência à formação do pescoço, além disso, se confirma que o sistema de refrigeração da tocha Infocus tem uma importante influência sobre a elevação na vida do eletrodo.

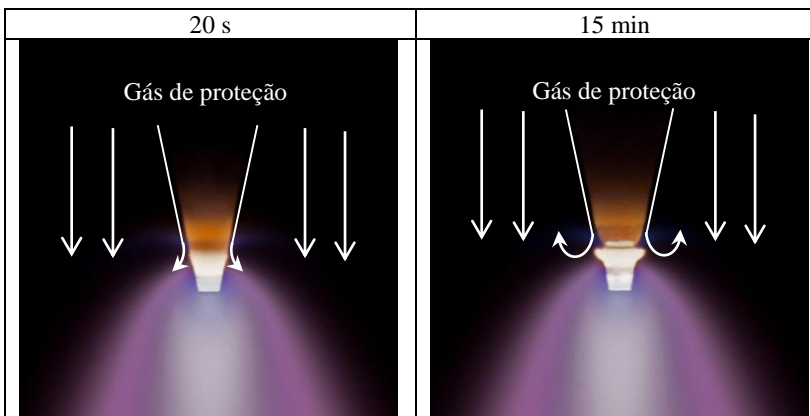


Figura 48 – Mecanismo de formação do pescoço atrás do anel na superfície do eletrodo.

4.3. TIG KEYHOLE

O processo TIG não é muito considerado para trabalhos de uniões de chapas espessas, embora novas pesquisas feitas por Schnick et al. [1], Lohse et al [7] e Jarvis et al. [2] demonstram as novas possibilidades que o processo TIG oferece para essas aplicações. Uma das características notadas, pelos autores anteriormente mencionados, é o maior nível de corrente necessária para estabelecer o estado do *Keyhole*, em comparação ao processo Plasma. Segundo os desenvolvedores da tocha Infocus, uma das principais aplicações dela é a união de chapas através da técnica *Keyhole*, devido à grande concentração de energia na ponta do eletrodo, conseguida através do resfriamento centrado nele. Na Figura 49, se comparam os três tipos de eletrodos, usando as condições de soldagem descritas na Tabela 8, demonstrando que uma tocha e eletrodos de tungstênio convencional conseguem trabalhar com a técnica *Keyhole*. Embora a maior diferença observada entre os eletrodos da Figura 49 foi a menor temperatura que possui a tocha Infocus. Também é possível observar que as manchas catódicas dos eletrodos com conteúdo de lantânio tem uma área similar, em comparação ao com 2% de tório. Este possui uma área de emissão levemente maior, o qual corrobora os resultados encontrados no apartado 4.1 do trabalho.

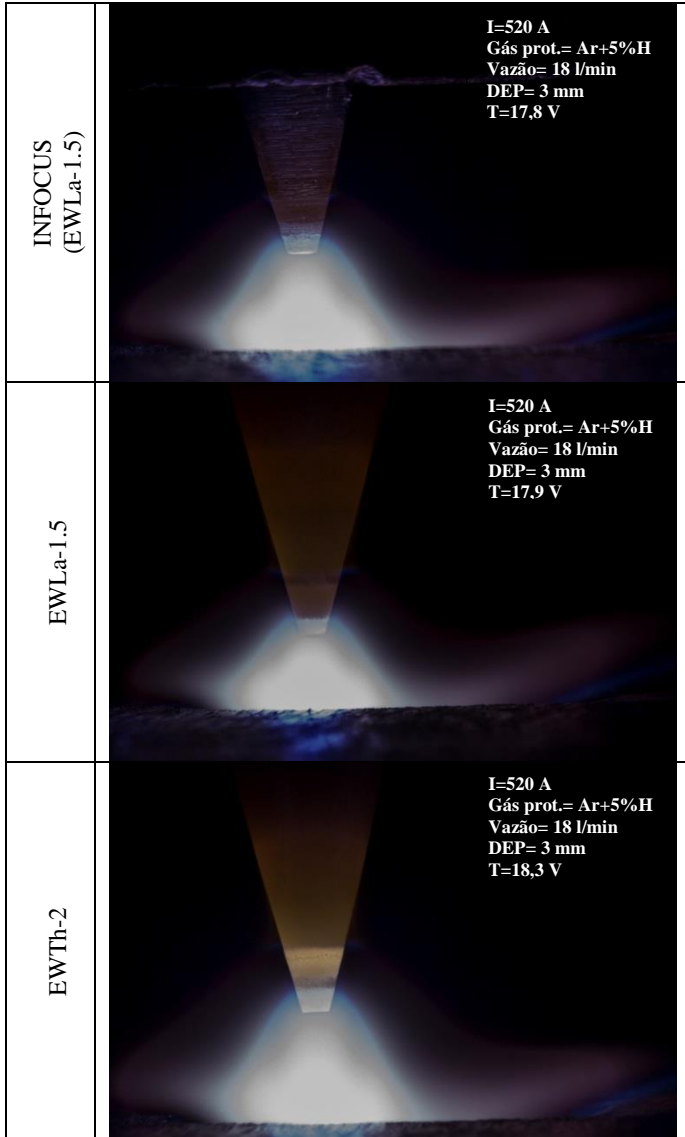


Figura 49 – Comparação para três tipos de eletrodos de tungstênio sob as mesmas condições de soldagem com *Keyhole* estabelecido.

O desgaste nos eletrodos, para as condições de soldagem utilizadas na Figura 49, são bem diferenciados. Para demonstrar qual tocha oferece a melhor produtividade, foram testados os três tipos de eletrodos até não conseguirem mais abrir um arco estável. Na Figura 50 se observa o desgaste do eletrodo de tungstênio com 2% de tório, depois de 10 *Keyholes* contínuos de 27 cm de comprimento. Nota-se uma grande perda da geometria da ponta no quinto *Keyhole*, enquanto no nono *Keyhole* a ponta já tem um pescoço detrás do anel de dendritas de tungstênio. Foi constatado que a vida média do eletrodo de tungstênio com 2% de tório é de 10 *Keyhole* contínuos.

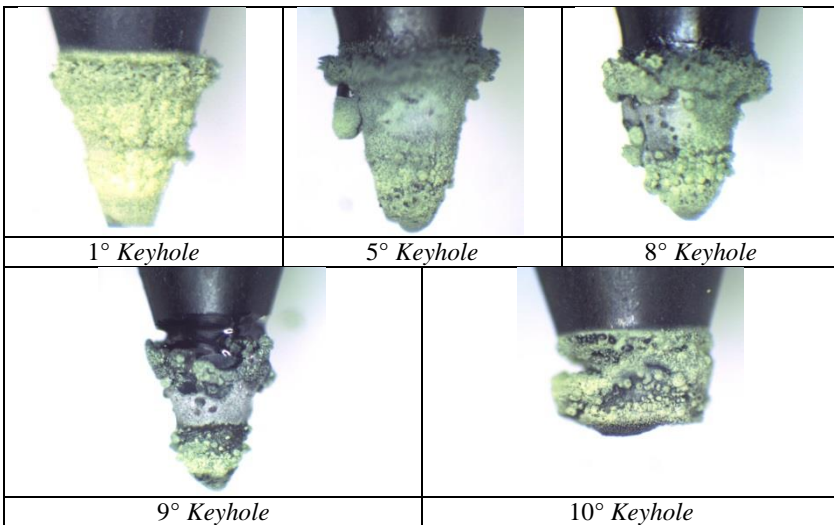


Figura 50 – Desgaste do eletrodo de tungstênio com 2% de tório depois de 10 juntas de 27 cm utilizando 520 A de corrente.

No caso do eletrodo com 1,5% de lantânio a vida média aumenta para 27 *Keyholes* por afiação. Na Figura 51 se observa o desgaste da ponta do eletrodo, além de perceber que ele ainda mantém a geometria da ponta depois do 5° *Keyhole*, em comparação ao eletrodo com 2% de tório.

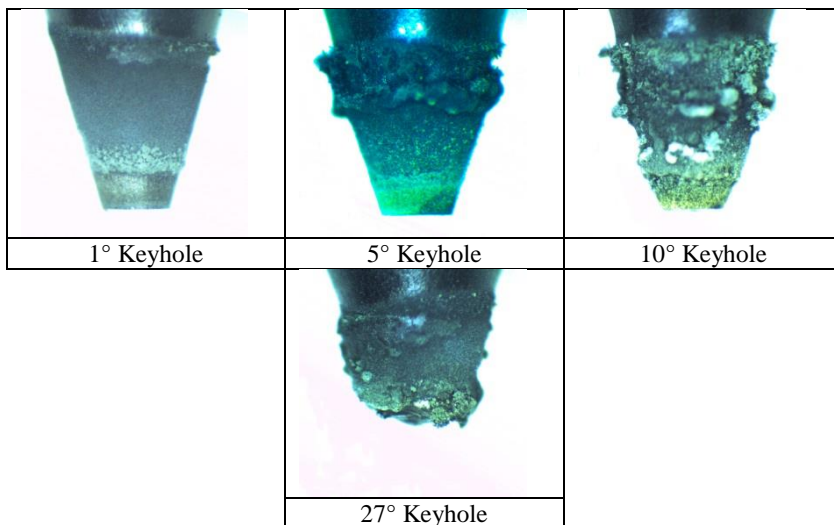


Figura 51 - Desgaste do eletrodo de tungstênio com 1,5% de lantânio depois de 27 juntas de 27 cm utilizando 520 A de corrente.

Já o eletrodo utilizado pela tocha Infocus (EWLa-1.5) tem a vida média de 43 *Keyholes* por eletrodo. Na Figura 52 se mostra como o eletrodo não perde a geometria da ponta durante toda a vida dele, o qual garante as propriedades do arco ao longo da junta. Nesse sentido, a tocha Infocus demonstra uma superioridade em comparação a uma tocha convencional.

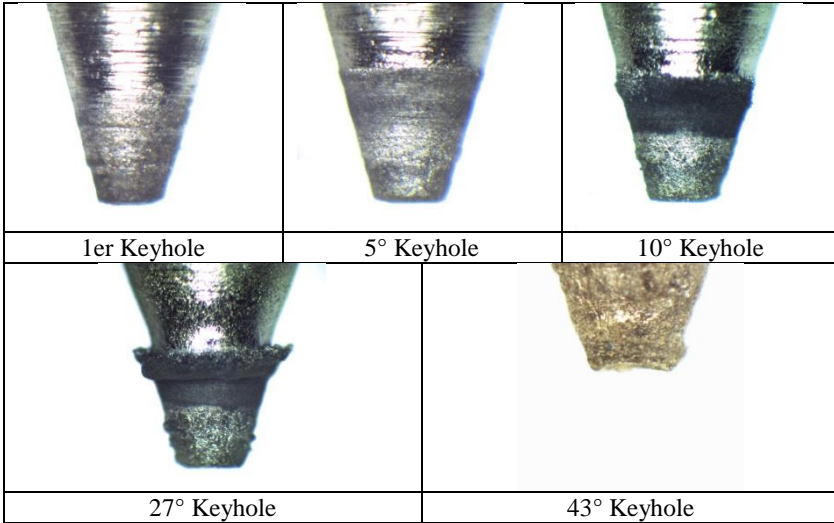
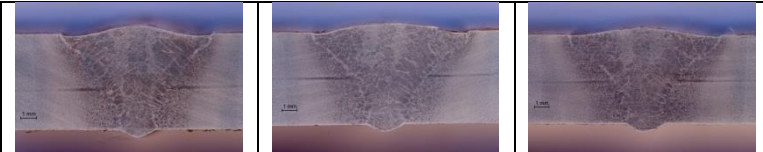


Figura 52 - Desgaste do eletrodo de tungstênio com 1,5% de lantânio depois de 43 juntas de 27 cm utilizando 520 A de corrente.

As macrografias das juntas feitas através do *Keyhole* apresentadas na Figura 53, demonstram que o eletrodo de lantânio com a tocha convencional TIG tem a tendência de obter uma menor largura de cordão e raiz, porém, a maior influência do lantânio foi na ZAC, que possui valores inferiores ao eletrodo com 2% de tório, demonstrando que efetivamente eletrodos com conteúdo de lantânio conseguem arcos mais constrictos. Porém, também é possível notar que o sistema de refrigeração da tocha Infocus não possui um efeito significativo sobre a constrição catódica do arco de soldagem.



[mm]	EWLa-1.5	Infocus (EWLa-1.5)	EWTh-2
Largura Face	10	10,9	10,8
Largura Raiz	2,5	2,7	2,8
Reforço Raiz	0,5	0,5	0,6
ZAC	13,5	13,9	14,4

Figura 53 – Comparação das macrografias das juntas feitas com as diferentes tochas.

O aspecto superficial das juntas feitas com o processo TIG usando a técnica *Keyhole*, não se difere muito entre os eletrodos utilizados. Na Figura 53 e a Figura 54, é possível notar que as juntas feitas ficam com mordeduras ao longo do cordão, o qual também foi notado na pesquisa feita por Jarvis [5]. O aparecimento das mordeduras corresponde à falta de material para preencher por completo a junta. Essa falta de material se deve à formação da raiz, lembrando que o processo utilizado é autógeno. Isso se verifica na Figura 55, onde é possível observar o mecanismo de trabalho de um TIG *Keyhole* estável.

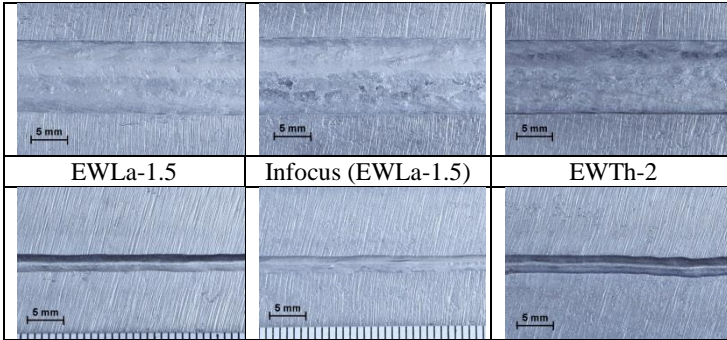


Figura 54 – Aspectos superficiais da face e raiz das juntas feitas com a técnica *Keyhole* com o rocesso TIG.

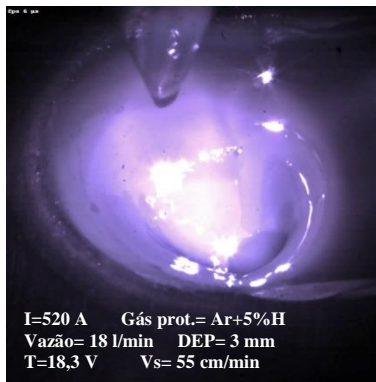


Figura 55 – TIG *Keyhole* com eletrodo de tungstênio com 2% de tório.

4.3.1. *Keyhole* com adição de material

Para solucionar o problema das mordeduras, vários autores usam material de adição [5,2,19,1]. Porém, nenhum desses autores especifica se o fornecimento de material deveria ser pela frente (PF) ou por trás (PT) da poça de fusão, e se existe alguma influência na estabilidade do *Keyhole*. Na Figura 56 foram comparadas as macrografias das seções transversais das juntas feitas com fornecimento de arame pela frente e por trás do *Keyhole*, segundo as condições de soldagem descritas na Tabela 10. Percebe-se que a uma velocidade de arame de 2,5 m/min já desaparecem as mordeduras mostradas na Figura 53.

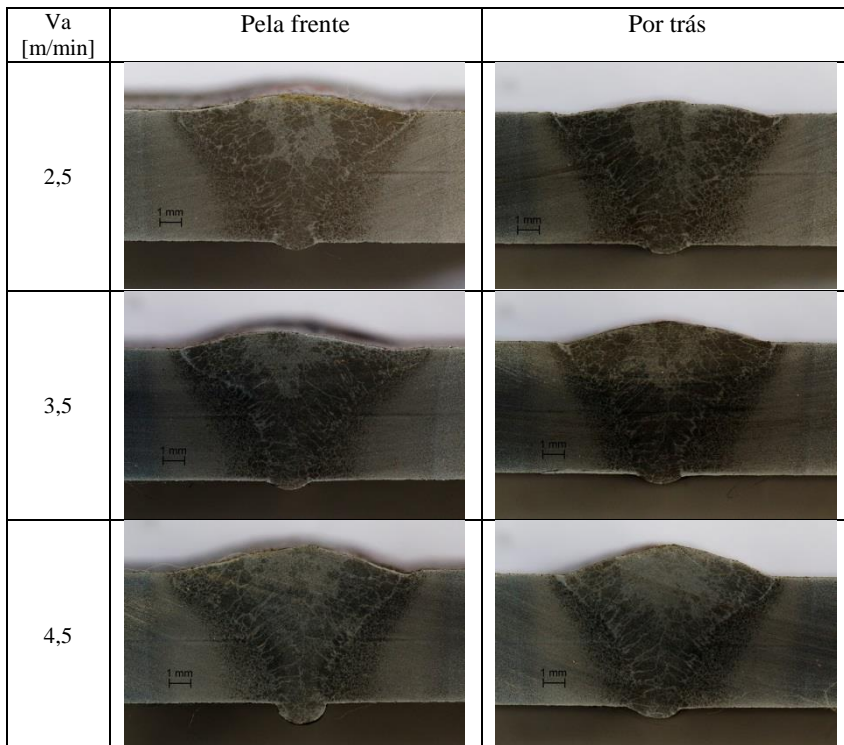


Figura 56 – Comparações das seções transversais para diferentes velocidades de arame fornecido pela frente (PF) e por trás (PT) do *Keyhole*.

Adicionando o material por de trás do *Keyhole* e aumentando a velocidade de alimentação de arame, a largura do cordão é diminuída, como o mostrado na Figura 57. Por outro lado, alimentação de arame pela frente do *Keyhole*, não mostra uma influência clara sobre o comportamento da largura do cordão.

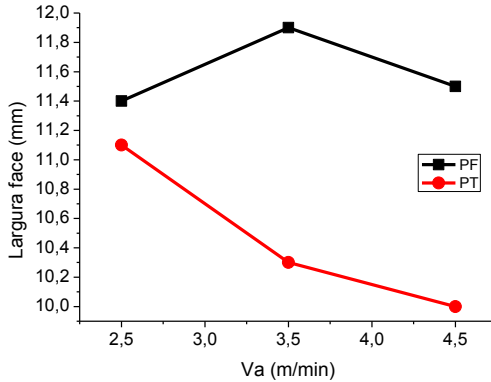


Figura 57 – Largura da face dos cordões feitos com adição de arame pela frente (PF) e por trás (PT) do *Keyhole*.

No caso da raiz das juntas, o comportamento da largura é totalmente diferente. Na **Error! Reference source not found.** se observa que para alimentação de arame por trás do *Keyhole* a largura da raiz é maior em comparação à alimentação pela frente, o qual se deve à maneira como ingressa o material na poça fundida. No caso da alimentação por trás do *Keyhole* o material não ingressa ao buraco, ele é fundido e desprendido antes de conseguir ficar perto do *Keyhole*. Na Figura 59 se observa o descrito anteriormente. Portanto, com a alimentação por trás do *Keyhole* existe uma menor quantidade de material disponível para formar a raiz, em comparação ao caso da alimentação pela frente, fazendo que a largura da raiz seja maior.

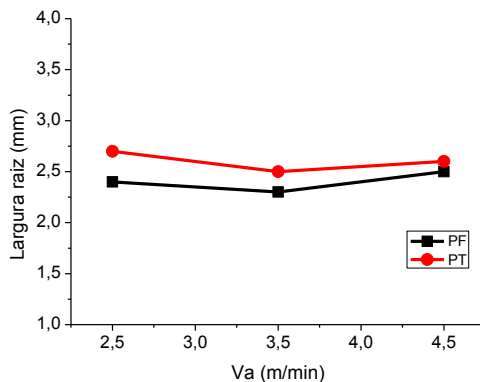


Figura 58 – Largura da raiz dos cordões feitos com adição de arame pela frente (PF) e por trás (PT) do *Keyhole*.

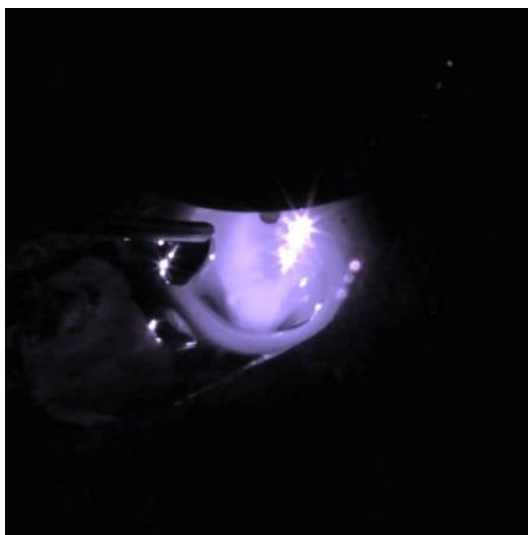


Figura 59 – Adição de material por trás do *Keyhole*.

O comportamento da largura da face também pode ser explicado usando a justificativa do paragrafo anterior. A diminuição na largura da face no caso da alimentação por trás, se deve ao incremento na quantidade de material que é depositado no cordão que está em processo de solidificação, o qual evidentemente acelera o resfriamento da poça atrás do *Keyhole*. Além disso, é possível notar que para uma velocidade

de arame de 4,5 m/min, os dados da Figura 57 e Figura 58 não são muito representativos e fogem da tendência da curva, isso é devido à instabilidade que produzem altas velocidades de arame sobre a poça de fusão, afetando diretamente a geometria do cordão tanto na face como na raiz. Na Figura 60 se observa que no caso da alimentação de arame pela frente, a instabilidade é maior, afetando tanto a raiz como a face da junta. No caso da alimentação por trás a instabilidade é menor, porém, a geometria da raiz não é homogênea.

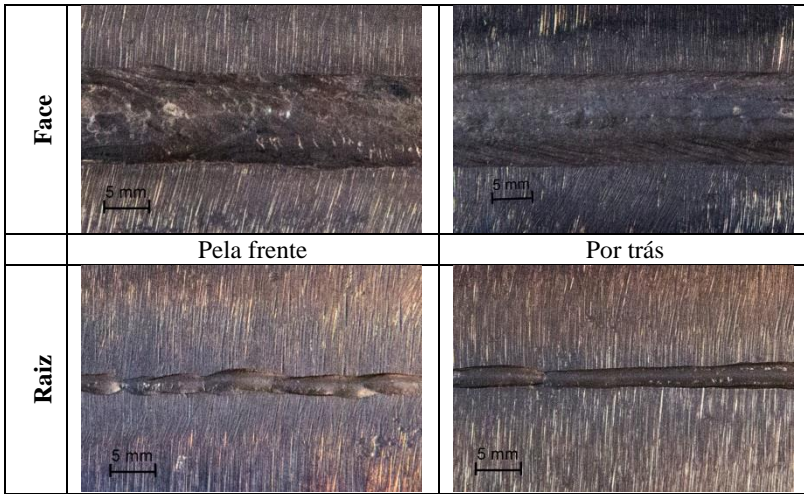


Figura 60 – Aparência superficial das juntas com 4,5 m/min de adição de material.

Os reforços das faces se elevam com o aumento da velocidade de arame, como é mostrado na Figura 61. O reforço na alimentação de arame por trás do *Keyhole* é maior, o qual é um resultado totalmente esperado segundo o explicado em parágrafos anteriores nesse trabalho.

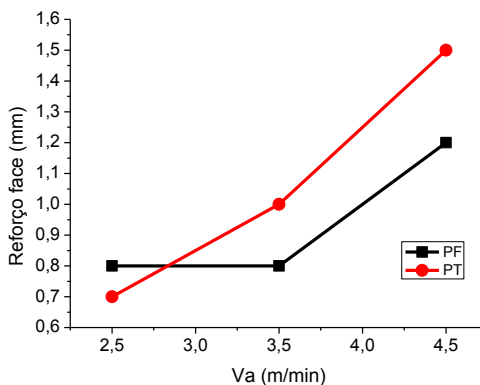


Figura 61 – Reforço na face das juntas feitas com adição de arame pela frente (PF) e por trás (PT) do *Keyhole*.

Na Figura 62 o reforço na raiz não apresenta grandes variações, para as duas formas de adição de material, exceto para os 4,5 m/min de alimentação pela frente, o qual é um dado que foge da média, devido à instabilidade que existe nessa velocidade de alimentação, como foi observado na Figura 60.

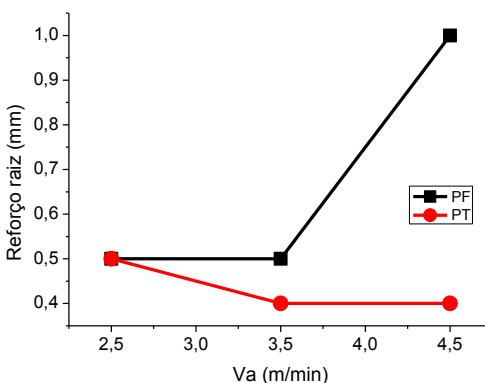


Figura 62 - Reforço na raiz das juntas feitas com adição de arame pela frente (PF) e por trás (PT) do *Keyhole*.

Com alimentação por trás do *Keyhole* a Zona Afetada pelo Calor (ZAC) diminui consideravelmente, em comparação a um fornecimento de arame pela frente. Na Figura 63 se observa como a tendência das duas formas de alimentação diminui a ZAC.

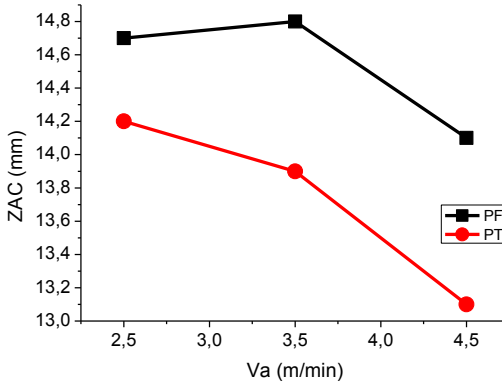


Figura 63 – Zona afetada pelo calor (ZAC) para diferentes velocidades de arame.

Depois das análises anteriormente feitas, seria fácil concluir que a alimentação por trás da poça de fusão é a melhor opção. Porém, esse tipo de alimentação tem a dificuldade de precisar um bom alinhamento e posicionamento do arame com respeito ao eletrodo e à poça de fusão. Se a distância entre a poça de fusão não é correta, não haverá fusão total do arame provocando instabilidades durante a solidificação do cordão. Enquanto que se o arame entra muito perto do eletrodo ele começará uma transferência metálica em voo livre, o qual também provoca instabilidade na poça em solidificação. Por outro lado, adição de arame pela frente da poça requer uma menor precisão, já que o arame aponta na área onde estará o arco de soldagem no material de base, fundindo tudo ao mesmo tempo, não afetando a solidificação do cordão. Portanto, adição de material por trás do *Keyhole* fornece melhores propriedades na junta.

4.3.2. Efeito da velocidade de soldagem no *Keyhole*

A velocidade de soldagem que é possível alcançar usando a técnica *Keyhole*, e como ela influi no processo foi estudada nesse tópico. Usando argônio puro como gás de proteção e um eletrodo de tungstênio com 2% de tório, foi possível trabalhar com velocidades entre 35 e 50 cm/min, além das condições de soldagem descritas na Tabela 11 e a Tabela 12. Na Figura 64 percebe-se como o buraco da raiz do *Keyhole* se desloca no sentido contrario ao sentido de avanço da tocha quando se aumenta a velocidade de soldagem.

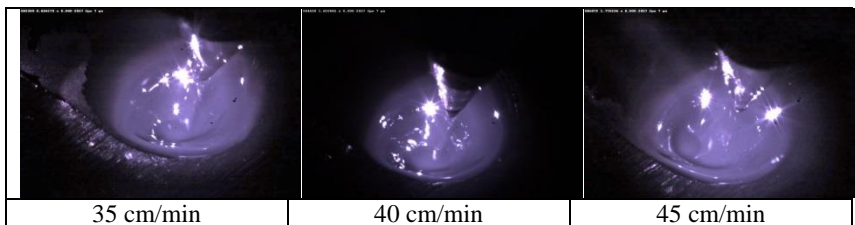


Figura 64 – Comportamento do *Keyhole* em diferentes velocidades de soldagem.

Para uma velocidade de 50 cm/min o *Keyhole* é estabelecido, mas o desgaste da ponta do eletrodo é tão rápido que não consegue completar a junta. Na Figura 65 mostra diferentes imagens durante um mesmo cordão, percebendo que inicialmente existe um *Keyhole* estável, mas com o passar do tempo o buraco some, provocando a instabilidade da poça. Por outro lado, o eletrodo tem um desgaste excessivo devido à instabilidade e a desaparecimento do buraco, como se pode observar na Figura 66.

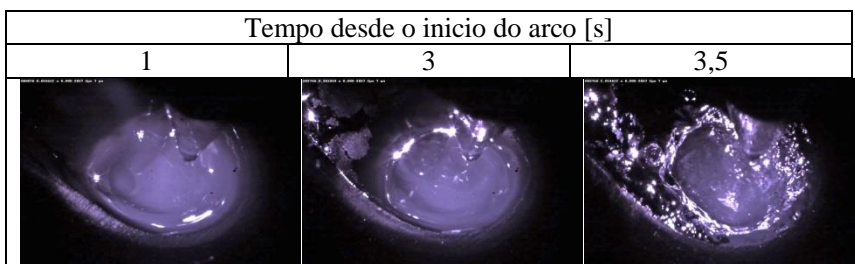


Figura 65 – Efeito do desgaste do eletrodo sobre o *Keyhole* para uma velocidade de 50 cm/min para um mesmo cordão.

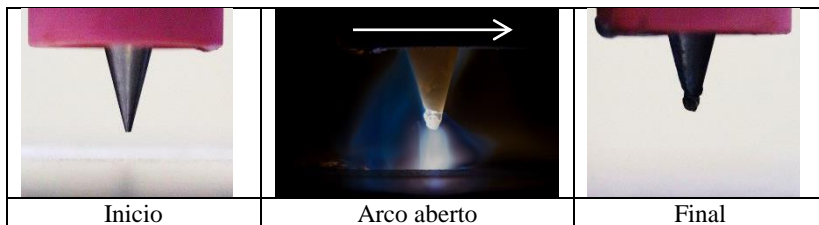


Figura 66 – Desgaste do eletrodo para uma velocidade de soldagem de 50 cm/min com argônio como gás de proteção usando a técnica *Keyhole*.

O desgaste excessivo do eletrodo para elevadas velocidades, tem relação com a posição do buraco da raiz do *Keyhole*. Como foi mencionado anteriormente, o buraco da raiz se desloca no sentido contrário ao sentido de avanço da tocha quando se aumenta a velocidade de soldagem, portanto, isso dificulta a saída do jato de plasma pelo buraco da raiz, fazendo que ele retorne em direção à ponta do eletrodo desgastando severamente a superfície posterior do eletrodo, como se observa na Figura 66.

Procurando aumentar a produtividade do processo, foi trocado o gás de proteção para uma mistura Ar+5%H, resultando em uma elevação na faixa de trabalho do *Keyhole*, entre 55 e 65 cm/min segundo as condições de soldagem descritas na Tabela 12. Porém, ocorreu sobre o eletrodo o mesmo mecanismo de desgaste da Figura 66, usando 65 cm/min de velocidade de soldagem. Nessas condições, o eletrodo da Infocus consegue completar a junta sem um grande desgaste, mas existem muitas possibilidades de contaminação da ponta do eletrodo, devido à instabilidade da poça fundida.

Na Figura 67 se encontram as macrografias das juntas feitas para velocidades de soldagem entre 55 e 65 cm/min. Para uma velocidade de 65 cm/min se observa uma face e raiz do cordão irregular, provocadas pela instabilidade do *Keyhole*.

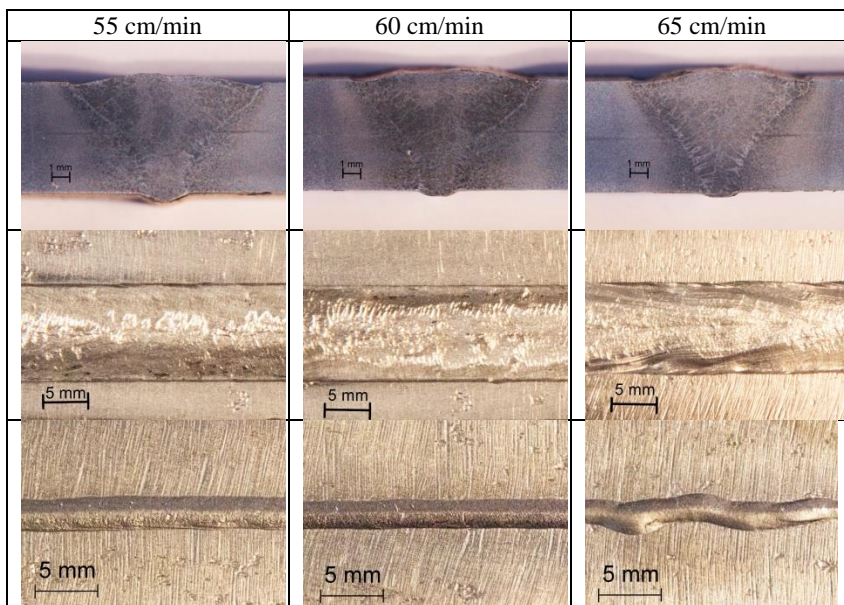


Figura 67 – Aparência superficial e transversal das juntas para diferentes velocidades de soldagem usando Ar+5%H como gás de proteção.

Realizando um análise geométrica das macrografias é possível notar que na medida em que se aumenta a velocidade de soldagem as larguras da face e da raiz da junta diminuem, como se verifica na Figura 68. O reforço da raiz e da ZAC também diminuem com o aumento na velocidade de soldagem, observado na Figura 69 e Figura 70. A tendência à diminuição dos parâmetros geométricos do cordão se deve à menor quantidade de energia disponível para fundir material e, portanto, o cordão será cada vez mais estreito para maiores velocidades de soldagem, até o ponto que o *Keyhole* perca a estabilidade, como aconteceu para os 65 cm/min.

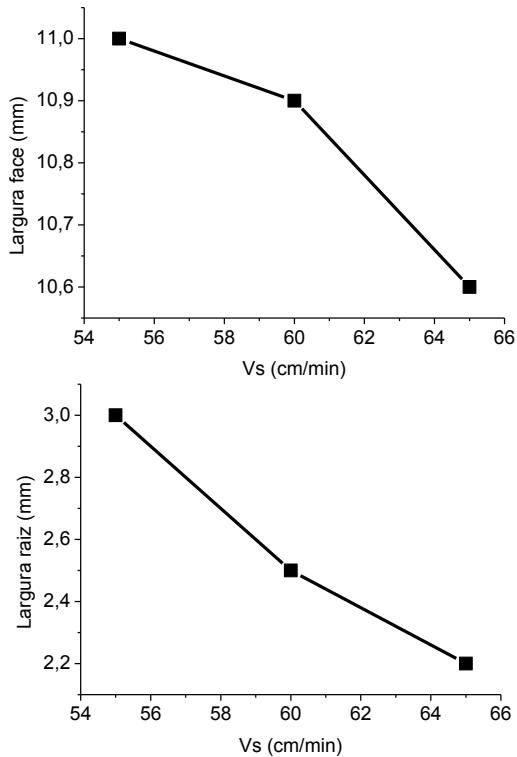


Figura 68 – Análise das larguras da face e raiz das juntas para diferentes velocidades de soldagem.

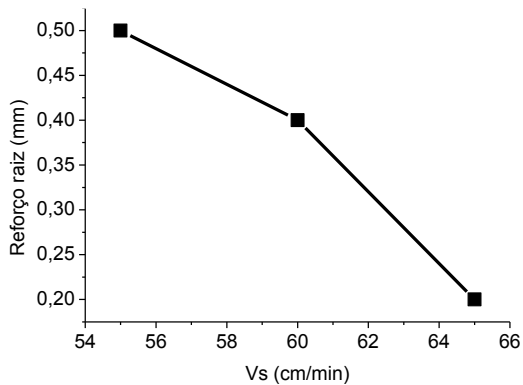


Figura 69 – Reforço da raiz para diferentes velocidades de soldagem.

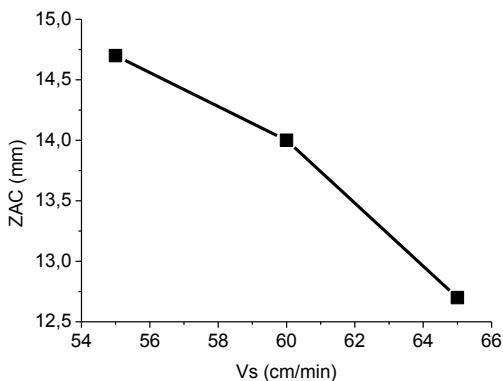


Figura 70 – Zona Afetada pelo Calor (ZAC) para diferentes velocidades de soldagem.

Através de análises feitas é possível dizer que a velocidade máxima a ser alcançada com o processo TIG *Keyhole*, dependerá do gás de proteção utilizado. Também se conclui que quanto maior for a corrente maior será a velocidade de soldagem, mas com isso, também se elevará a taxa de desgaste do eletrodo. Nesse sentido, a tocha Infocus demonstra uma grande superioridade, já que ela consegue trabalhar com altos níveis de corrente sem prejudicar a vida do eletrodo.

4.3.3. Distância eletrodo peça (DEP)

Um parâmetro importante no processo TIG é a distância entre a ponta do eletrodo de tungstênio e o material de base. A relevância desse parâmetro é tanta que existem dispositivos como o AVC (*Arc Voltage Control*) para garantir que ele seja constante. Portanto, é essencial saber a influência da DEP sobre o TIG *Keyhole*, e se realmente seria necessário utilizar um AVC com esta técnica. Na Figura 71 são apresentadas as macrografias da seção transversal das juntas feitas para diferentes DEP, segundo as condições de soldagem descritas na Tabela 13 e a Tabela 14, demonstrando que com argônio como gás de proteção é possível trabalhar com até 6 mm de DEP, garantindo penetração total da junta.

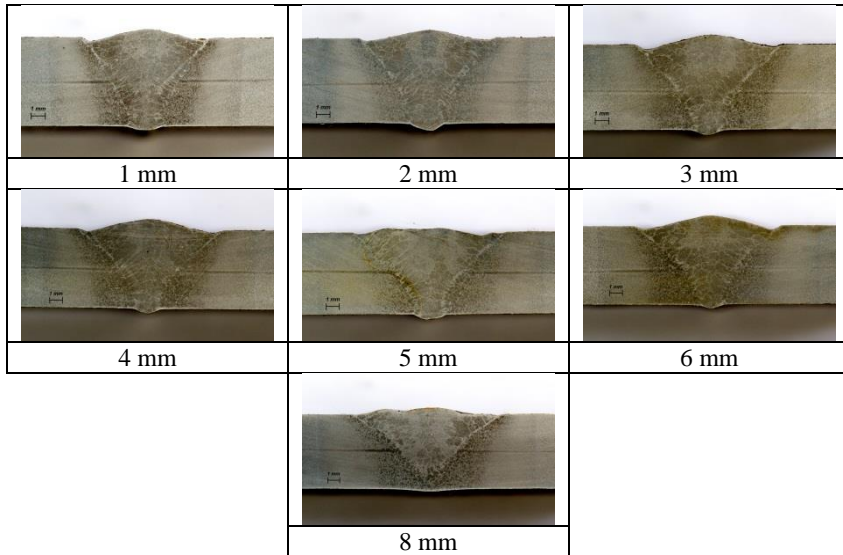


Figura 71 - Influência da distância eletrodo peça no TIG *Keyhole* com argônio como gás de proteção.

No caso da mistura Ar+5%H como gás de proteção, a DEP se eleva, podendo ser trabalhada por até 8 mm, como se observa na Figura 72. Esse aumento é devido à maior energia proporcionada pelo hidrogênio e suas propriedades de gás diatômico. Para distância maiores a 8 mm o acendimento do arco de soldagem por alta frequência fica mais difícil.

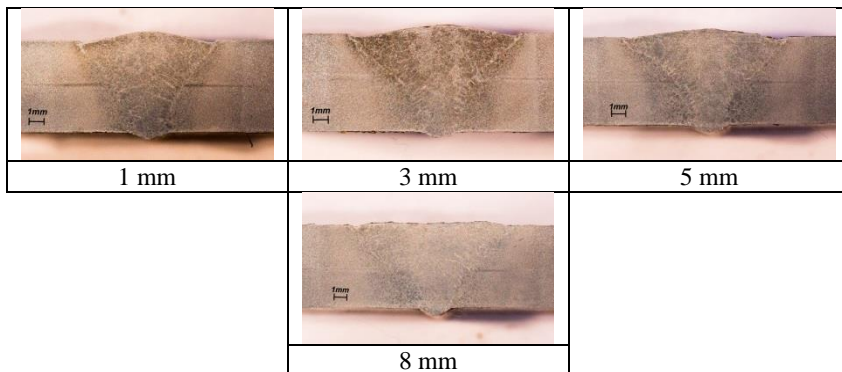


Figura 72 - Influência da distância eletrodo peça no TIG *Keyhole* com Ar+5%H como gás de proteção.

O aumento da DEP tem a tendência de aumentar a largura da face do cordão, Figura 73, o qual se deve ao maior diâmetro do arco de soldagem sobre a peça. A DEP não tem uma influência significativa sobre a largura da raiz (Figura 74), embora quando a mistura Ar+5%H é utilizada, a largura da raiz tende a diminuir, o qual se deve à perda de pressão no arco de soldagem ao ficar com o eletrodo mais afastado da junta.

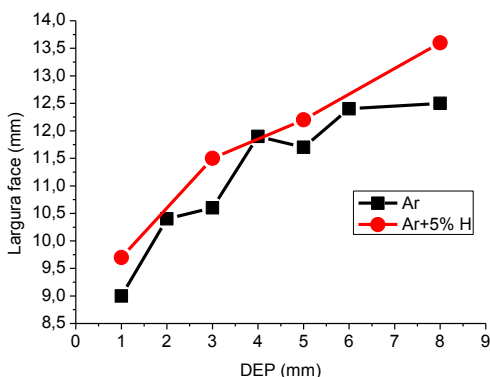


Figura 73 – Largura da face para as juntas feitas com argônio e mistura Ar+5%H como gás de proteção para diferentes DEP.

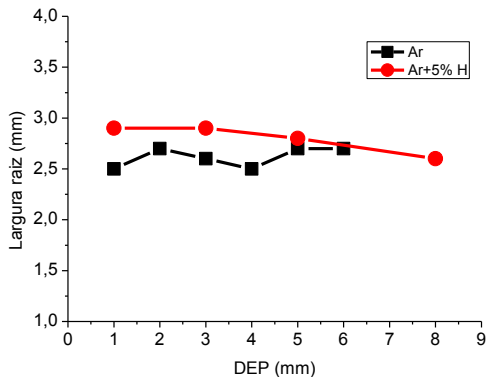


Figura 74 - Largura da raiz para as juntas feitas com argônio e mistura Ar+5%H como gás de proteção para diferentes DEP.

No caso do efeito da DEP sobre o reforço da raiz, não se tem uma tendência clara. O Ar+5%H faz com que o reforço tenha uma variação de aproximadamente 0,2 mm, que pode ser considerada pouco significativa. A Figura 75 apresenta os resultados mencionados. A mistura Ar+5%H fornece geometrias de cordão mais homogêneas, o qual se deve ao arco com maior energia e maior pressão.

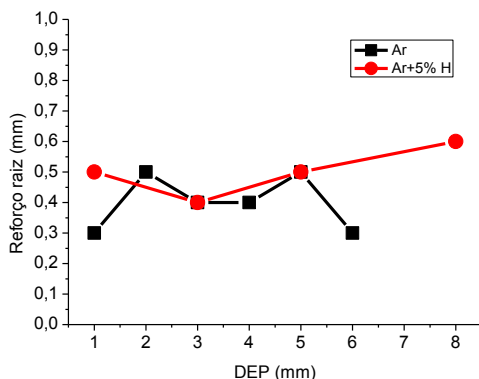


Figura 75 - Reforço da raiz para as juntas feitas com argônio e mistura Ar+5%H como gás de proteção para diferentes DEP.

O gráfico da ZAC apresentado na Figura 76 considera só o comprimento total da área recristalizada no material de base, ou seja, não está incluso o comprimento da área fundida. Portanto, é possível

dizer que a mistura Ar+5%H consegue uma menor ZAC em comparação ao argônio puro, entretanto, a mistura gasosa possui uma maior área fundida (Figura 73). Desta maneira é possível concluir que o Ar+5%H provoca uma menor distorção na microestrutura do material de base, evidentemente, deve se ter em conta que as velocidades de soldagem utilizadas para cada gás de proteção foram diferentes (Tabela 14), porém, aquelas velocidades são as mínimas para estabelecer um *Keyhole* estável. Como foi mencionado anteriormente, a adição de hidrogênio (gás diatômico) ao argônio produz uma elevação considerável nas propriedades do arco, conseguindo maiores velocidades de soldagem e fundindo uma maior quantidade de material.

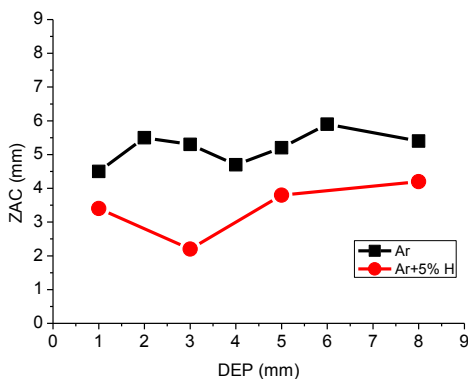


Figura 76 - ZAC para as juntas feitas com argônio e mistura Ar+5%H como gás de proteção para diferentes DEP.

A potência do processo evidentemente varia com a DEP, devido ao princípio de funcionamento do arco no processo TIG. Também é possível notar na Figura 77, que a mistura Ar+5%H utiliza uma maior quantidade de potência, o qual se deve à maior tensão do arco necessária para acender e manter o arco de soldagem.

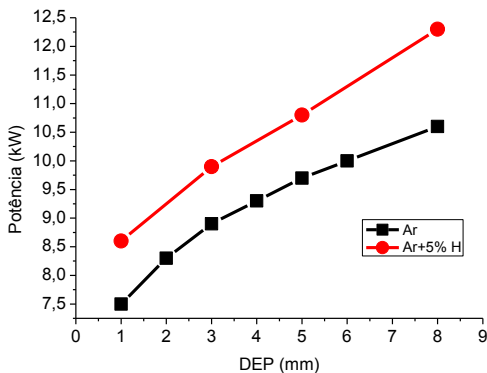


Figura 77 – Potência utilizada para as juntas feitas com argônio e mistura Ar+5%H como gás de proteção para diferentes DEP.

Enquanto à estabilidade do processo TIG *Keyhole* frente a variações na DEP, na Figura 78 é possível observar como o arco é estável e com a mesma geometria até os 4 mm de DEP, depois dessa distância o arco se torna relativamente instável e a geometria do arco muda, formando-se uma cauda que se eleva com o aumento da DEP. A elevação e o crescimento da cauda se deve ao maior tamanho do arco de soldagem pelo lado da face da junta, porém, ele mantém um buraco de raiz quase similar, segundo foi verificado na Figura 74. Portanto, para DEP maiores que 4 mm, parte do arco de plasma que saía pela raiz do *Keyhole*, começa a sair pela face da junta. Condições similares foram verificadas no estudo da velocidade de soldagem no item 4.3.2.

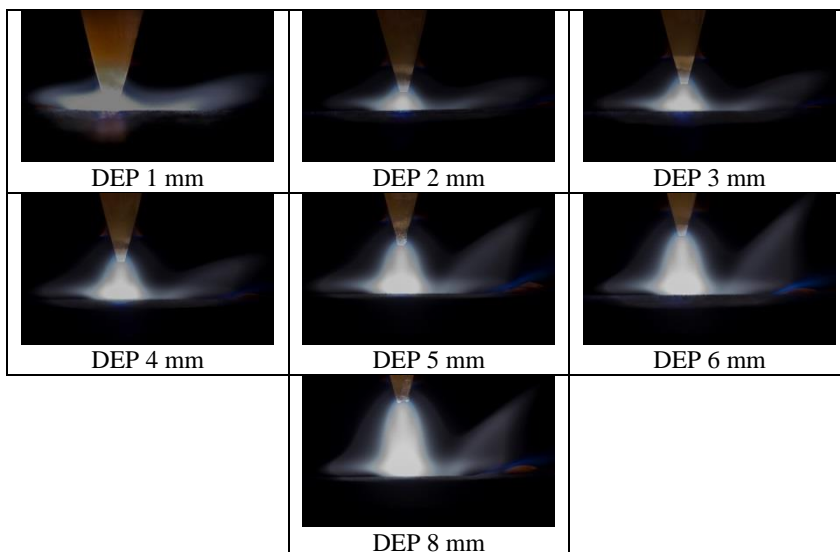


Figura 78 - Estabilidade do TIG *Keyhole* para diferentes distâncias eletrodo peça usando Argônio como gás de proteção.

O efeito da DEP sobre a geometria do cordão, como foi mostrado, é bastante considerável. Nos dois trabalhos feitos por Jarvis [5] [2], é comentado que as melhores propriedades geométricas foram conseguidas para DEP negativas, ou seja, com a ponta do eletrodo dentro do *Keyhole*. Lohse [7] descreve um comportamento similar tanto para aço carbono como inox. Porém, o problema para realizar o *Keyhole* com DEP negativa é o início e o final do cordão, o qual requereria equipamentos e programação especial.

4.4. FABRICAÇÃO DE PAREDES DE CALDEIRA ATRAVÉS DO PROCESSO TIG *KEYHOLE*.

Dentro das novas e possíveis aplicações para o processo TIG *Keyhole*, encontra-se a fabricação de paredes de caldeiras, especificamente a tarefa de unir os tubos com as membranas. Atualmente essa atividade é realizada com o processo MIG/MAG e chanfrando a junta. Uma união feita pelo processo de soldagem MIG/MAG é apresentada na Figura 79.



Figura 79 – Juntas tubo-membrana de painéis de caldeira feita através do processo MIG/MAG.

Uma alternativa ao processo MIG/MAG na fabricação de painéis de caldeiras é o processo híbrido Plasma-MIG. O trabalho apresentado no *Welding Journal* [26] descreve como o processo Plasma-MIG é uma alternativa real ao MIG/MAG, além de conseguir uma maior produtividade. Porém, ele ainda precisa que a junta seja chanfrada.

Através do estudo feito sobre o processo TIG *Keyhole*, alguns ensaios foram realizados para saber a real factibilidade de sua aplicação na união dos tubos e membranas. As condições utilizadas nesses ensaios são descritas na Tabela 15, enquanto que o design da junta é apresentado na Figura 80.

Tabela 15 - Condições e parâmetros de soldagem para tubos e membranas.

Parâmetro	
Material do tubo e a membrana	Aço carbono 16Mo3
Espessura	6,35 mm
Posição de soldagem	Plana
Material de adição	ER80S-B2 (AWS A5 28/A5.28M-2005)
Diâmetro de arame	1,2 mm
Gás de proteção	Ar+5%H
Vazão de gás	18 l/min
Backing	Cobre
Tocha TIG	Infocus
Corrente	600 A

Velocidade de soldagem	49 cm/min
Velocidade de arame	3 m/min

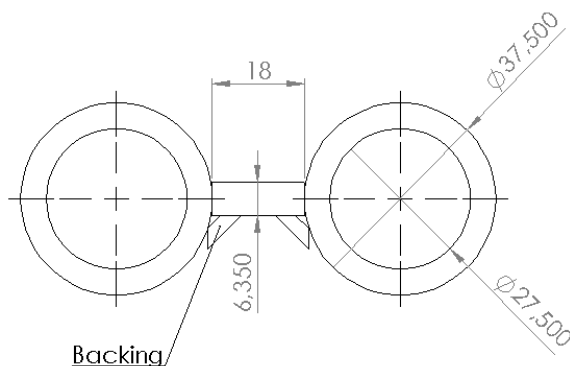


Figura 80 - Design do corpo de prova para os ensaios de tubos e membranas.

Como foi mencionado durante o estudo desse trabalho, o TIG *Keyhole* geralmente deixa umas mordeduras aos costados do cordão, por tal motivo, adição contínua de arame foi requerida. O posicionamento da tocha e o arame são descritos na Figura 81.

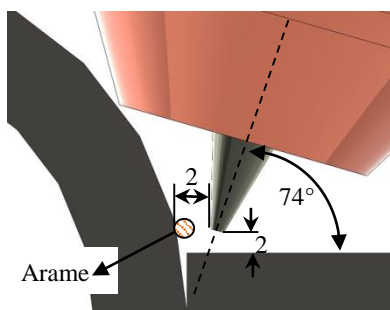


Figura 81 – Esquema do posicionamento da tocha e o material de adição.

A junta obtida é mostrada na Figura 82, observando-se que possui uma mordedura ao longo da junta na interface tubo-junta. A raiz tem uma boa aparência, porém tem um reforço variável. A face da junta se encontra sem mordeduras na interface membrana-junta.

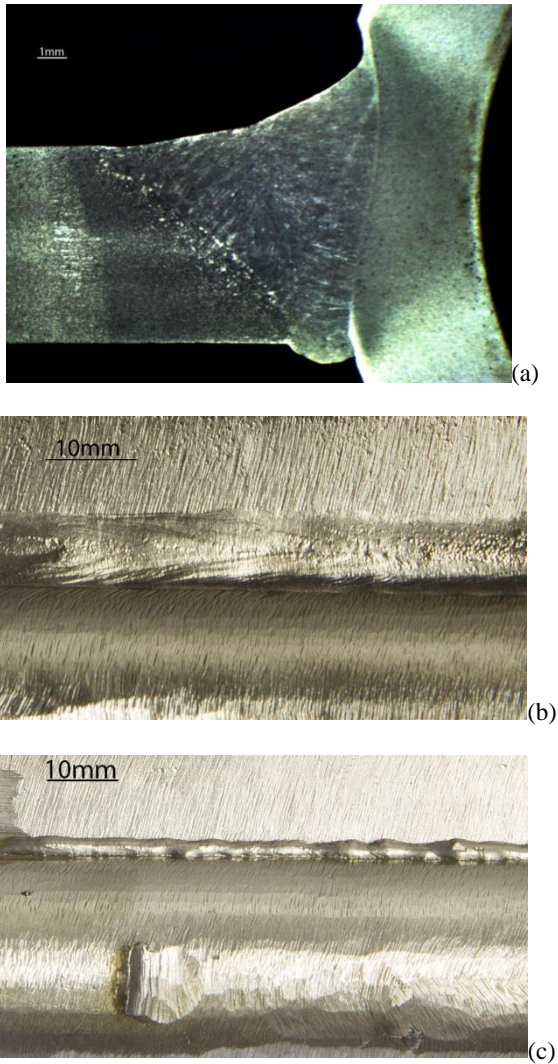


Figura 82 – Junta tubo-membrana (a) corte transversal (b) face da junta (c) raiz da junta.

Devido à variação no reforço da raiz, foi feito um ensaio de raios X para procurar alguma falta de fusão ou bolhas de gás retidas dentro da junta, a Figura 83 apresenta a imagem obtida por raios X da junta tubo-

membrana possibilitando assim, se observar imperfeições ao longo da junta.

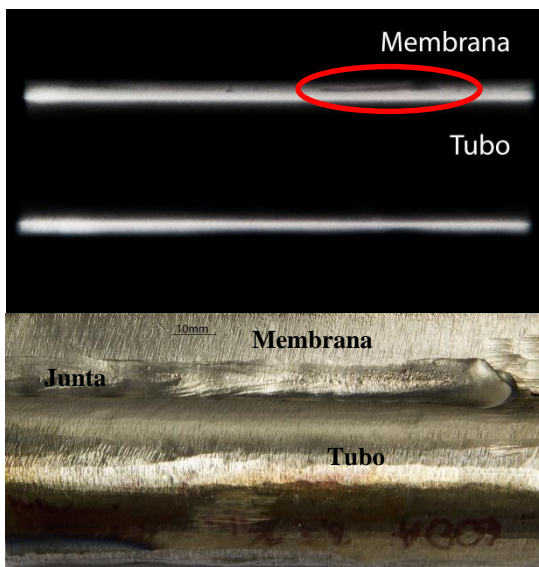


Figura 83 – Raios X da junta tubo e membrana.

Com a posição estimada das falhas detectadas através dos raios X, foi realizado um corte transversal na junta para observar os defeitos. Na Figura 84 é possível notar que a falha se localiza no meio da junta, crescendo desde a raiz até a face do cordão, indicando que a bolha se encontrava saindo da junta.

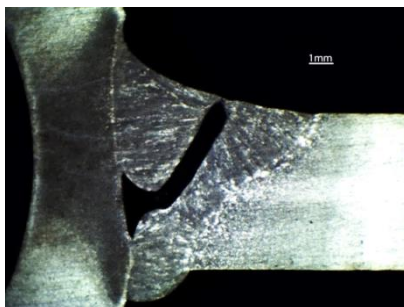


Figura 84 – Imperfeição na junta membrana-tubo

A possível origem dos defeitos detectados por raios X é o plasma da *Keyhole*, que sai pela raiz e reflete no *backing* de cobre, retornando à junta pela raiz ainda líquida. Das 6 uniões feitas, em 4 se encontraram o mesmo tipo de defeito ao se realizar um corte transversal da junta. Li et al [27] também encontrou esse tipo de defeito usando o *Keyhole* com o processo LASER.

Uma solução proposta para melhorar esses defeitos, é a utilização de corrente pulsada com o TIG *Keyhole*, tentando conseguir uma maior turbulência na poça que começa a solidificar, permitindo que as bolhas de gás consigam sair do cordão. Os parâmetros utilizados são descritos na Tabela 16.

Tabela 16 – Parâmetros usados para o *Keyhole* pulsado.

Parâmetro	
Eletrodo	EWTh-2 - Ø 6,35mm
Corrente de Pulso	500 A
Corrente de Base	100 A
Tempo de Pulso	10 ms
Tempo de Base	5 ms
Ângulo de afiação do eletrodo	30°
Truncamento da ponta do eletrodo	0,6 mm
Velocidade de soldagem	55 cm/min
DEP	3 mm
Gás de proteção	Ar+5%H
Vazão de gás de proteção	18 l/min
Gás de purga	Ar
Vazão de gás de purga	8 l/min
Material de base	Aço SAE 1020
Espessura do material de base	6,35 mm

A geometria do TIG *Keyhole* Pulsado realizado em chapas planas é apresentada na Figura 85. O *Keyhole* foi estável e sem defeito nenhum no cordão. A potência usada para realizar a junta foi de 8,8 kW similar à obtida pelo TIG *Keyhole* corrente contínua.



Figura 85 – Macrografia da seção transversal do cordão feito com TIG *Keyhole* Pulsado.

A utilização do TIG *Keyhole* como alternativa para fabricar as paredes de caldeiras, não estava contemplada no planejamento desse projeto. Por tal motivo não havia corpos de prova de tubos e membranas suficientes para poder continuar com o estudo. Considera-se como trabalho futuro continuar com esta linha de pesquisa, que demonstra muito potencial como solução à fabricação de painéis de caldeira. Ressalta-se que a fortaleza dessa solução é a simplicidade do processo e do design da junta, que não precisa de chanfro.

4.5. COMPARAÇÃO ENTRE OS PROCESSOS PLASMA E TIG *KEYHOLE*

No item 4.3.3 foi comprovado que o processo TIG consegue trabalhar com a técnica *Keyhole*. Para distâncias tocha peça (DTP), ou também chamada distância eletrodo peça (DEP), superiores a 6 mm e com argônio puro como gás de proteção, não foi possível estabelecer o *Keyhole*, mas não foi percebido tunelamento e porosidade no cordão de solda.

O trabalho feito por Silva de Paula [21] sobre o processo Plasma *Keyhole*, foi utilizado como referência para realizar a comparação com o processo TIG. A Figura 86 analisa as larguras das juntas feitas entre os processos Plasma e TIG, notando que o primeiro consegue cordões mais estreitos, além de demonstrar que no processo Plasma a DTP tem uma baixa influência sobre a largura do cordão, porém, para DTP menores a

largura obtida pelo processo TIG é similar ao processo Plasma, devido à redução de perdas de energias da coluna de plasma com o ambiente, concentrando toda a energia do arco em uma menor área.

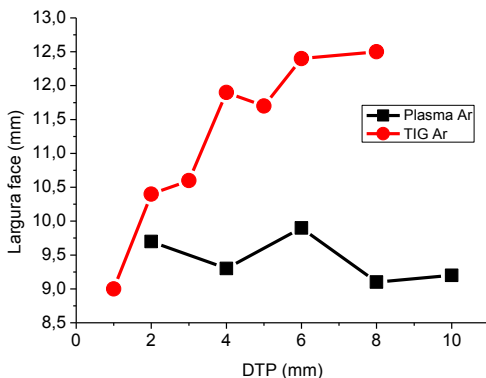


Figura 86 – Comparação das larguras dos cordões de solda para diferentes DTP entre os processos Plasma e TIG utilizando a técnica *Keyhole* sobre chapas de aço SAE 1020 de 6,35 mm de espessura.

Com respeito à zona afetada pelo calor (ZAC), a Figura 87 apresenta a comparação entre os dois processos de soldagem, corroborando que o Plasma tem uma menor ZAC que o TIG, e que a diferença se acrescenta para maiores DTP. Porém, o processo TIG demonstra que DTP mais baixas possuem propriedades similares ao Plasma, esse comportamento é devido à geometria cônica do arco de soldagem do processo TIG.

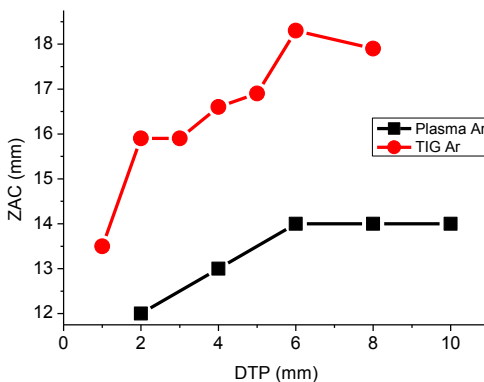


Figura 87 – Comparação das ZAC para diferentes DTP entre os processos Plasma e TIG utilizando a técnica *Keyhole* sobre chapas de aço SAE 1020 de 6,35 mm de espessura.

A influência da DTP sobre a geometria da raiz é apresentada na Figura 88 e a Figura 89. No caso do processo Plasma, quanto maior a DTP, menor será a largura da raiz, enquanto para o processo TIG ela não tem uma influência significativa sobre a largura e o reforço da raiz, implicando que o TIG fornece uma maior estabilidade de raiz e, portanto, da junta.

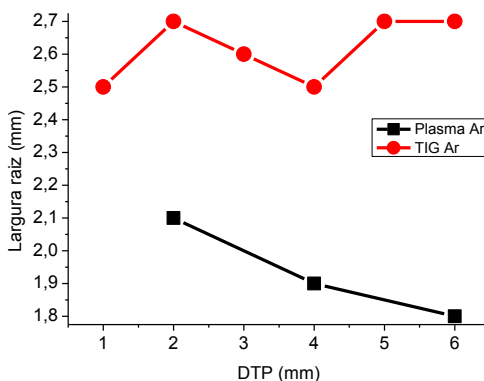


Figura 88 – Comparação da largura da raiz para diferentes DTP nos processos Plasma e TIG utilizando a técnica *Keyhole* sobre chapas de aço SAE 1020 de 6,35 mm de espessura.

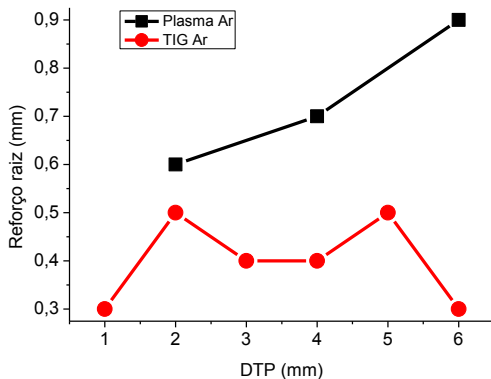


Figura 89 - Comparação do reforço da raiz para diferentes DTP nos processos Plasma e TIG utilizando a técnica *Keyhole* sobre chapas de aço SAE 1020 de 6,35 mm de espessura.

Sobre a influência da DTP é possível dizer que o processo Plasma tem uma menor sensibilidade que o processo TIG, o que vai de acordo com a bibliografia anteriormente exposta. Porém, deve-se notar que no TIG a DTP entre 1 e 3 mm, apresentou geometrias do cordão similares às do processo Plasma, além disso, a velocidade de soldagem do TIG (40 cm/min) foi quase 200% maior que o processo Plasma (19 cm/min). Vergara [22] menciona que o processo Plasma tem uma baixa tolerância à variação da velocidade de soldagem, que em espessuras de chapas de aço carbono de 3,5 mm, o *Keyhole* pode ser estabelecido entre 23 e 26 cm/min, ou seja, uma faixa operacional de 3 cm/min. Enquanto Silva de Paula [21] descreve que o aço carbono de 6,35 mm de espessura consegue trabalhar entre 17,5 e 20 cm/min, portanto, uma faixa operacional de 2,5 cm/min. Porém, segundo os ensaios realizados no item 4.3.2 o processo TIG *Keyhole*, como é resumido na Tabela 17, consegue uma faixa de operação de 13 cm/min. Com isso se conclui que o processo TIG possui uma maior robustez, com DTP entre 1 e 6 mm, ao trabalhar em aplicações de uniões de chapas através da técnica *Keyhole*.

Tabela 17 – Comparação de faixas de operação entre o processo TIG e o Plasma com *Keyhole* para diferentes espessuras de aço carbono SAE 1020.

Processo de soldagem	Espessura da chapa [mm]	Velocidade de soldagem [cm/min]	Faixa operacional [cm/min]
Plasma	3,5	23 – 26	3
	6,35	17,5 – 20	2,5
TIG	6,35	35 – 48	13

Na Tabela 18 é possível notar que o processo Plasma precisa de uma corrente de 230 A e uma tensão de 30 V para usar o *Keyhole*, segundo as medições feitas por Silva de Paula [21], enquanto, o processo TIG necessitou de 520 A e 15,5 V para fazer a mesma junta, indicando que o Plasma necessita de uma menor potência. Porém, o TIG usa uma maior velocidade de soldagem, resultando em uma produtividade maior em comparação ao processo Plasma. Embora o processo TIG tenha uma menor energia sobre a peça, como foi evidenciado na Figura 87, o tamanho da ZAC é ligeiramente maior em comparação ao processo Plasma, devido à forma de cone do arco de solda do processo TIG.

Tabela 18 – Comparação de parâmetros elétricos entre o processo Plasma e TIG com a técnica *Keyhole* em chapas de aço carbono SAE 1020 de 6,35 mm de espessura e argônio como gás de proteção, para uma DTP 2 mm.

Processo de soldagem	Corrente [A]	Tensão [V]	Potência [kW]	Velocidade de soldagem [cm/min]	Energia [kJ/cm]
Plasma	230	30	6,9	19	21,8
TIG	520	15,5	8,3	40	12,1

Procurando aumentar a produtividade do processo TIG foi trocado o gás de proteção de argônio puro, por uma mistura de argônio com 5% de hidrogênio, como foi apresentado no item 4.3.2, resultando em uma velocidade de soldagem maior (64 cm/min), com uma faixa de trabalho de 11 cm/min. Além de elevar a velocidade de soldagem, foi possível estabelecer o *Keyhole* com até 8 mm de DEP, aumentando a robustez e o intervalo de trabalho do processo TIG.

Através dos ensaios feitos, se observou que a estabilidade do arco TIG aumenta na medida em que a corrente é elevada, devido ao acrescentamento das forças eletromagnéticas sobre o arco de soldagem, conclusão similar foi alcançada por Jarvis e Ahmed [2] em seu estudo da tocha K-TIG. Na Figura 78 é possível observar o arco TIG para os diferentes níveis de DTP demonstrando a estabilidade e adaptação dele frente a variações no material de base. O furo na face do TIG *Keyhole* é relativamente maior com relação à profundidade, permitindo assim que a tensão superficial do metal fundido ajude a manter a estabilidade do *Keyhole*, alcançando um equilíbrio natural entre as forças do arco e a tensão superficial do furo [5]. No processo Plasma, dado que a densidade de energia e a pressão do plasma são dependentes de outras variáveis, como a vazão dos gases, corrente, alinhamento e diâmetro do bocal constritor, resultando um *Keyhole* bastante sensível às mudanças dos parâmetros de soldagem, dificultando controlar o processo. Embora o arco TIG continue com a forma característica de cone, o *Keyhole* se mantém estável e o cordão resultante é livre de imperfeições, com a mesma qualidade que o processo plasma pode obter, embora com uma maior velocidade de soldagem e robustez. A forma de cone do arco TIG, de fato, ajuda a aumentar a tolerância às imperfeições do material de base. Enquanto o Plasma *Keyhole* devido à alta concentração de energia e contração da coluna de arco, é pouco tolerante a imperfeições no material de base.

Um fator operacional importante é o alinhamento da tocha com a junta, lembrando que no processo Plasma o eletrodo de tungstênio se encontra recuado no bocal constritor, se tornando difícil realizar o alinhamento entre o centro do orifício do bocal e o centro da junta, além de precisar de um tempo maior para conseguir a distância certa de recuo do eletrodo, enquanto no processo TIG o eletrodo se encontra visível ao operador, facilitando o alinhamento e a troca do eletrodo. O diâmetro do furo do bocal constritor do processo Plasma é importante na estabilidade do *Keyhole*, porém ele tem uma vida limitada devido à erosão provocada pelo jato de plasma, enquanto que no processo TIG só utilizando as forças próprias do arco de soldagem já se consegue a penetração suficiente para estabelecer o *Keyhole*, não precisando de um bocal constritor.

Os sistemas de acendimento do arco também são fatores importantes no momento de comparar os processos de soldagem. O processo Plasma precisa de um sistema de arco piloto, geralmente de

entre 3 a 15 A, para conseguir ligar o arco principal. Enquanto que no processo TIG o arco se pode ligar através de curto circuito entre a ponta do eletrodo e a peça (sistema *lift-arc*), ou por sistema de tensão de alta frequência.

No processo TIG sempre se considerou que o eletrodo é facilmente contaminado, devendo assim, ser afiado constantemente. Porém, os últimos desenvolvimentos em eletrodos TIG foram focados em aumentar a sua vida útil, e segundo os ensaios feitos nos itens 4.2 e 4.3, ela teve uma elevação em até 400%. Um exemplo desse desenvolvimento é o eletrodo da tocha Infocus, que possui uma elevada resistência ao desgaste, além de ser facilmente substituída.

O equipamento requerido para o processo Plasma é bastante sofisticado em comparação ao processo TIG, na Figura 90 é apresentada uma comparação entre os equipamentos para cada processo, ficando evidente que o processo TIG é um processo mais econômico e que precisa de um menor investimento inicial para ser adquirido. Neste sentido, cabe ressaltar que o processo Plasma além de precisar um módulo de plasma, necessita de dois gases, um de proteção e outro de plasma. Também é importante dizer, que as vazões dos gases utilizados requerem de certa precisão, que um manômetro convencional não fornece.






	Fonte de soldagem	Refrigeração	Unidade especial	Tocha
PLASMA				
TIG INFOCUS				
K-TIG				

Figura 90 – Equipamento utilizado para o processo TIG e Plasma *Keyhole*.

Uma fonte de soldagem para o processo TIG sempre será mais econômica que uma para o processo Plasma, embora a fonte necessária para trabalhar com *Keyhole* precise de até 1000 A. Na Figura 90 também se comparam as duas tochas TIG de alta produtividade atualmente no mercado, ressaltando que a K-TIG precisa de uma unidade externa de controle, e o tamanho da tocha é maior que da Infocus. O tamanho da K-TIG é comparável ao de uma tocha Plasma, e trabalha com 1000 A igual à Infocus.

Um fator também importante para se considerar, é o nível de treinamento do operador de um desses processos de soldagem. O processo TIG requer o mínimo treinamento, devido à simplicidade do processo, enquanto que um operador do processo Plasma precisa de um treinamento mais complexo devido à quantidade de variáveis e preocupações que devem ser tomadas. O operador deve possuir

habilidades para reconhecer cada um dos efeitos das variáveis envolvidas no Plasma *Keyhole*.

A comparação feita pela empresa K-TIG [17] entre os processos Plasma e TIG é mostrada na Tabela 19, observando-se que o TIG possui melhores características operacionais que o processo Plasma, ao utilizar a técnica *Keyhole*.

Tabela 19 – Comparação entre os processos Plasma e TIG *Keyhole*. Adaptado de K-TIG [17].

	TIG <i>Keyhole</i>	Plasma <i>Keyhole</i>
Penetração	Até 16 mm	Até 10 mm
Velocidade de soldagem	Até 100 cm/min	Até 50 cm/min
Complexidade	Simple	Altamente complexo, muitos parâmetros
Tolerância	Boa tolerância às imperfeições da junta	Requere um ajuste preciso
Estabilidade do <i>Keyhole</i>	Alta estabilidade, autocorreção do <i>Keyhole</i>	Instável
Custos	Baixos	Altos
Habilidades do operador	Baixos	Altos
Alinhamento do Eletrodo	Não significativo	Crítico, precisa de frequentes intervenções
Bico constritor	Não precisa de constrição	Crítico, vida limitada devido à erosão do jato de plasma
Arco piloto	Não precisa	Precisa de 3 a 15 A para iniciar o arco piloto
Ciclo de trabalho	100%	Geralmente 60%

Na Figura 91 é proposta uma comparação entre os processos Plasma e TIG *Keyhole*, usando como referência a Figura 25 do *Welding Handbook* [18], ficando mais evidente as diferenças entre os dois processos de soldagem.

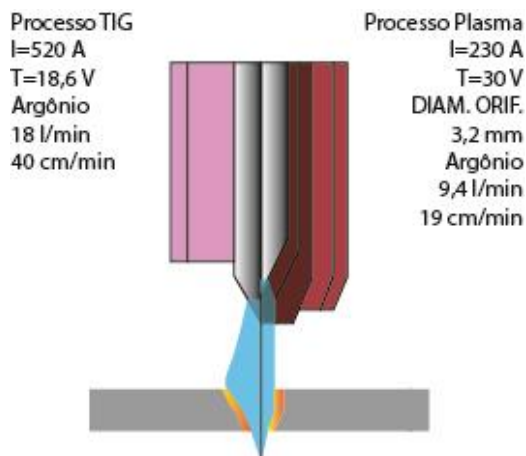


Figura 91 – Comparação entre os processos Plasma e TIG utilizando a técnica *Keyhole*.

5. CONCLUSÕES

Através do entendimento e correta interpretação dos comportamentos físico-tecnológicos do processo TIG *Keyhole*, e da nova abordagem comparativa com o processo de soldagem Plasma, com base nos objetivos específicos propostos, é possível concluir que:

- Não existe uma diferença significativa no comportamento da tensão, para as mesmas condições de soldagem, entre a tocha Infocus e uma tocha convencional TIG. Além, segundo as comparações realizadas às manchas catódicas dos eletrodos, não existe uma diferença determinante e conclusiva que demonstre a existência de uma constrição catódica no eletrodo da tocha Infocus.
- Entre as diferentes ligas de eletrodos convencionais de tungstênio testadas, o EWLa-1.5 demonstrou possuir as melhores características de resistência ao desgaste. O eletrodo usado pela tocha Infocus, também EWLa-1.5, tem uma maior vida em comparação a um eletrodo convencional TIG, devido ao sistema de refrigeração da Infocus, que diminui a temperatura do eletrodo, dificultando a formação de dendritas e óxidos sobre a superfície dele. O sistema de refrigeração da Infocus eleva a vida do eletrodo tungstênio em 163%, em comparação a um eletrodo da mesma composição.
- A tocha Infocus realmente consegue trabalhar com a técnica *Keyhole*, de maneira estável e repetitiva. Porém, a tocha convencional TIG utilizada nesse trabalho, também conseguiu usar a técnica *Keyhole* da mesma forma que a Infocus. Portanto, o *Keyhole* não está restrito a tochas TIG de design especial.
- Efetivamente o processo Plasma *Keyhole* consegue um cordão mais estreito e com menor ZAC, porém, o processo TIG *Keyhole* com DEP menores a 2 mm consegue geometrias similares ao Plasma, além de possuir uma melhor adaptação às imperfeições da junta.
- O processo Plasma precisa de uma menor potência que o processo TIG para realizar uma junta através da técnica *Keyhole*, porém, a velocidade de soldagem conseguida

pelo processo TIG é aproximadamente 200% superior ao processo Plasma, para condições similares de trabalho.

- Também se percebeu que o processo TIG é um processo mais simples e possui menos variáveis a serem levadas em conta, o que facilita o treinamento de novos operadores. Além disso, os equipamentos utilizados pelo processo TIG são mais simples e relativamente mais em conta que os do processo Plasma.

6. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho permitiu desvendar e redefinir os novos limites do processo TIG e suas novas possíveis aplicações. Institutos de pesquisas continuam trabalhando em aproveitar e fortalecer as propriedades do arco de soldagem TIG, como foi o caso da tocha Infocus. Também foi possível notar que o processo TIG baixo certas condições consegue fazer as mesmas aplicações que o processo Plasma, em especial em aplicações de uniões de chapas. Com base nos resultados obtidos nesse trabalho, propõe-se continuar o desenvolvimento das seguintes linhas pesquisas:

- A. Processo TIG *Keyhole* para diferentes posições de soldagem.

Não foram realizados testes de soldagem fora da posição plana, porém, segundo o trabalho feito por Silva de Paula [21], o processo Plasma conseguiu trabalhar na posição vertical. A proposta é realizar ensaios em aplicações de união de tubos, ou seja, soldar em todas as posições (soldagem orbital). Para se conseguir fazer soldas em posições verticais e sobre cabeça será necessária uma DEP muito reduzida, na ordem de 1 a -1 mm, de maneira a conseguir concentrar toda a energia do arco e trabalhar com um *Keyhole* estável.

- B. Continuação soldagem de tubos e membranas.

Como foi comentado em itens anteriores, o TIG *Keyhole* Pulsado é uma boa alternativa para essa aplicação industrial, embora deva ser desenvolvida em uma melhor bancada de ensaios.

- C. Desgaste dos eletrodos.

Continuar com o estudo dos mecanismos de desgaste dos eletrodos de tungstênio com diferentes adições de terras raras, propondo alternativas de composições químicas, proteção gasosa e até de acessórios.

7.REFERÊNCIAS

1. SCHNICK, M. et al. Cathode focussed TIG - Fundamentals and Applications. **Interntional Institute of Welding**, 2010. Document XII-1985-10.
2. JARVIS, B. L.; AHMED, N. U. Development of keyhole mode gas tungsten arc welding process. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 5, n. 1, p. 1-7, 2000.
3. SADEK, A. A.; USHIO, M.; MATSUDA, F. Effect of rare earth metal oxide additions to tungsten electrodes. **Metallurgical transactions A**, v. 21A, p. 3221-3236, December 1990.
4. MATSUDA, F.; USHIO, M.; KUMAGAI, T. Study on Gas-Tungsten-Arc electrode (report 1): comparative study of characteristics of oxide-tungsten cathode. **Transactions of JWRI**, Osaka, v. 15, n. 1, p. 13-19, July 1986.
5. JARVIS, B. L. **Keyhole gas tungsten arc welding: a new process variant**. Wollongong: Doctor Philosophy thesis, Faculty of Engineering, University of Wollongong, 2001.
6. LATHABAI, S.; JARVIS, B. L.; BARTON, K. J. Comparison of keyhole and conventional gas tungsten arc welds in commercially pure titanium. **Materials Science and Engineering**, p. 81-93, 2001.
7. LOHSE, M. et al. Keyhole welding with CF-TIG. **International Institute of Welding**, 2013. Document XII-2141-13.
8. DA CRUZ, J. R.; SCOTTI, A. Materiais para Eletrodos que Emitem Termionicamente em Soldagem a Arco. **Soldagem e Inspeção**, v. 18, n. 4, p. 370-379, 2013.
9. GUILLE, A. E. Arc-electrode phenomena. **Proc. IEE, IEE Reviews**, v. 118, n. 9R, p. 1131-1154, 1971.
10. LANCASTER, J. F. The physics of fusion welding Part 1: The electric arc in welding. **IEE Proceedings**, v. 134, n. 5, p. 233-254, September 1987.
11. MATSUDA, F.; USHIO, M.; SADEK, A. Temperature and work function measurements with different GTA electrodes. **Transactions of the Japan Welding Society**, v. 22, n. 1, p. 3-9, April 1991.
12. USHIO, M.; TANAKA, K.; MATSUDA, F. Cathode Phenomena in GTA Welding. In: WELDING, I. I. O. **Physical Aspects of Arc**. Glasgow: IIW, 1993. p. 25-42.
13. USHIO, M. et al. Effect of grain morphology on consumption of GTA

- electrode. **Transactions of JWRI**, v. 20, n. 2, p. 147-153, 1991.
14. OGAWA, Y. High speed imaging technique part 1 - high speed imaging of arc welding phenomena. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 16, n. 1, p. 33-43, 2011.
 15. MATSUDA, F. et al. Effect of surface coating around tungsten electrode on formation of "Rim". **Transactions of JWRI**, Osaka, v. 16, n. 1, p. 211-214, May 1987.
 16. SCHUSTER, H. et al. **Brenner für das Wolfram-Inertgas-Schweißen, Elektrodeneinheit für uns Verfahren zum Betreiben des Brenners**. DE102009008250A1, 05 ago. 2010.
 17. K-TIG. K-TIG Advanced Welding Technologies, 2011. Disponível em: <<http://www.k-tig.com/>>. Acesso em: 15 set. 2014.
 18. WELDING Handbook. Miami: American Welding Society, v. 2, 1990.
 19. SCOTTI, A.; REIS, R. P. **Fundamentos e prática da soldagem a Plasma**. [S.l.]: Artliber, 2007.
 20. MARTIKAINEN, J. K.; MOISIO, J. I. Investigation of the effect of welding parameters on weld quality of plasma arc keyhole welding of structural steels. **Welding Journal**, p. 329s-340s, July 1993.
 21. SILVA DE PAULA, O. **Desenvolvimento e aplicação da soldagem plasma pela técnica keyhole**. Florianópolis: Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, 1997.
 22. VERGARA, V. **Influência de parâmetros e variáveis da soldagem plasma sobre as características da solda com ênfase na análise da abertura e no fechamento do keyhole**. Florianópolis: UFSC, 1999.
 23. DIAMOND GROUND, P. Diamond Ground Products, 2014. Disponível em: <<http://www.diamondground.com/why-buy-wolfram-tungsten-electrodes/>>. Acesso em: 29 January 2015.
 24. SAVAGE, F.; NIPPES, E. F.; AGUSA, K. Effect of arc force on defect formation in GTA welding. **Welding Journal**, p. 212s-224s, July 1979.
 25. FUENTE, J. **Einfluss der Brennergestaltung auf den WIG-Lichtbogen**. Dresden: TUDpress, 2011.
 26. HYBRID Welding: an alternative to saw. **Welding Journal**, p. 42-45, October 2007.
 27. LI, S. et al. Dynamic keyhole profile during high-power deep-penetration laser welding. **Journal of Materials Processing Technology**, n. 214, p.

565-570, 2014.