



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

Alisson Fernandes da Rosa

**ESTUDO DO PROCESSO TIG COM ESTRATÉGIAS INOVADORAS DE
INSERÇÃO DE ARAME PARA APLICAÇÃO EM SOLDAGEM ORBITAL**

FLORIANÓPOLIS
2019

Alisson Fernandes da Rosa

**ESTUDO DO PROCESSO TIG COM ESTRATÉGIAS INOVADORAS DE
INSERÇÃO DE ARAME PARA APLICAÇÃO EM SOLDAGEM ORBITAL**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Mateus Barancelli Schwedersky

Coorientador: Prof. Dr. Régis Henrique Gonçalves e Silva

Florianópolis

2019

Alisson Fernandes da Rosa

**ESTUDO DO PROCESSO TIG COM ESTRATÉGIAS INOVADORAS DE
INSERÇÃO DE ARAME PARA APLICAÇÃO EM SOLDAGEM ORBITAL**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca
examinadora composta pelos seguintes membros:

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

Cleber Marques, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Giovani Dalpiaz, Dr. Eng.
Petrobras S.A

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi
julgado adequado para obtenção do título mestre em Engenharia Mecânica

Prof. Jonny Carlos da Silva, Dr. Eng.
Coordenador do Programa

Prof. Mateus Barancelli Schwedersky, Dr. Eng.
Orientador

Florianópolis, 28 de outubro de 2019.

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

Rosa, Alisson Fernandes da
ESTUDO DO PROCESSO TIG COM ESTRATÉGIAS INOVADORAS DE
INSERÇÃO DE ARAME PARA APLICAÇÃO EM SOLDAGEM ORBITAL /
Alisson Fernandes da Rosa ; orientador, Mateus Barancelli
Schwedersky, coorientador, Régis Henrique Gonçalves e
Silva, 2019.
135 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. TopTIG. 3. Inserção de Arame.
4. Soldagem Orbital. I. Barancelli Schwedersky, Mateus .
II. Henrique Gonçalves e Silva, Régis . III. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica. IV. Título.

À minha família, especialmente aos meus pais Ângela e Cláudio e à minha companheira Luiza. Este trabalho é dedicado a vocês.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, devo agradecer àqueles que, de alguma forma, contribuem para manter neste país uma educação pública, gratuita e de qualidade.

Aos meus professores orientadores Dr. Eng. Mateus Schwedersky e Dr. Eng. Régis Silva, pelo aprendizado e pelas orientações nas atividades do mestrado.

Aos demais colegas do LABSOLDA, pelas experiências compartilhadas, pelo apoio técnico durante a realização deste trabalho e, sobretudo, pela amizade.

À ANP/PETROBRAS pelo fornecimento de recursos para o projeto “*Avanços no Processo TIG Aplicado à Soldagem Orbital Automática e Semiautomática de Tubulações*”, processo nº 2014/00025-6.

Aos amigos Carmem Pereira e Fernando Borges, por todo o suporte a mim oferecido durante o período da pós-graduação.

Por fim, aos amigos de longa data e a todos que abdiquei do convívio diário. Vocês todos, mesmo de longe e muitas vezes sem saber, foram essenciais para a conclusão dessa etapa.

“Onde quer que pise, ande onde quiser... aceite as consequências do que acha que te faz melhor!” (DEAD FISH, 2004)

RESUMO

A necessidade de maior competitividade em um mercado global exige que o setor brasileiro de energia melhore continuamente. No cenário de investimento em desenvolvimento tecnológico e dentro das linhas de pesquisa da engenharia estão inseridos diversos processos de fabricação, como o estudo da tecnologia da soldagem de tubulações de petróleo e gás, por exemplo. Uma das tecnologias do processo TIG que apresenta potencial para aumento de produtividade na soldagem orbital de dutos é a tecnologia TIG com alimentação tangencial, podendo ser encontrada com o nome comercial TopTIG. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo geral estudar de modo qualitativo o desempenho da versão do processo TIG com alimentação tangencial e sua aplicação em relação à soldagem mecanizada de união de dutos. Esta tecnologia, viabilizada por um bocal especial, é caracterizada principalmente por permitir a inserção de arame em uma região mais próxima ao eletrodo de tungstênio e de forma paralela ao ângulo de afiação. Desta forma, desenvolveu-se procedimentos de soldagem TIG orbital em tubos de aço inoxidável 304L, no que se refere à soldagem do passe de raiz e preenchimento de chanfros com diferentes equipamentos de soldagem com alimentação tangencial. Além disso, foram realizadas atividades de avaliação e adequações tecnológicas de um robô antropomórfico aplicado à soldagem orbital como, por exemplo, o controle do comprimento do arco, e também o desenvolvimento de um bocal especial com alimentação tangencial de arame. Os resultados que apresentam maior robustez e repetibilidade na soldagem TIG orbital estão relacionados à corrente pulsada no passe de raiz e corrente constante nos passes de preenchimento. Entretanto, a operação com o sistema TIG mecanizado demonstrou que, para se atingir resultados satisfatórios, é fundamental que a junta a ser soldada, de modo geral, apresente variações muito pequenas sobretudo em relação à abertura e espessura do nariz. O processo apresentou sensibilidade elevada à tais imperfeições. Além disso, embora tenham sido alcançados resultados satisfatórios, a operação do processo TIG orbital apresentou uma grande complexidade na sua parametrização e execução, principalmente quando o processo é operado com corrente e velocidades de soldagem elevadas. Apesar disso, no presente trabalho estabeleceu-se infraestrutura, integração de sistemas e equipamentos capazes de ampliar a gama de investigações e aplicações do processo TIG orbital com alimentação tangencial de arame.

Palavras-chave: TopTIG. Inserção de arame. Soldagem orbital.

ABSTRACT

The need for greater competitiveness in a global market requires the Brazilian energy sector to improve continuously. In the investment scenario in technological development and within the engineering research lines, several manufacturing processes are inserted, such as the study of oil and gas pipe welding technology, for example. One of the TIG process technologies that has the potential for increased productivity in orbital pipe welding is TIG technology with tangential feed and can be found under the trade name TopTIG. In this context, the present work has as general objective to study in a qualitative way the performance of the tangential feeding version of the TIG process and its application in relation to the mechanized welding of pipe joints. This technology, made possible by a special nozzle, is mainly characterized by allowing the insertion of wire in a region closer to the tungsten electrode and parallel to the sharpening angle. In this way, orbital TIG welding procedures were developed in 304L stainless steel tubes, with respect to root pass welding and chamfer filling with different tangentially fed welding equipment. In addition, evaluation and technological adaptation activities were performed for an anthropomorphic robot applied to orbital welding, such as arc length control, as well as the development of a special nozzle with tangential wire feed. The results which are more robust and repeatable in orbital TIG welding are related to the pulsed current in the root pass and constant current in the fill passes. However, operation with the mechanized TIG system has shown that, in order to achieve satisfactory results, it is extremely fundamental that the joint to be welded, in general, presents very small variations especially regarding the openings and thickness of the nose. The process showed high sensitivity to such imperfections. In addition, although satisfactory results were achieved, the operation of the orbital TIG process presented a great complexity in its parameterization and execution, especially when the process is operated with high current and high welding speeds. Nevertheless, the present work established infrastructure, systems and equipment integration capable of expanding the range of investigations and applications of the tangential wire feed orbital TIG process.

Keywords: TopTIG. Wire Insert. Orbital Welding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Ilustração da diferença entre alimentação tangencial e convencional no processo TIG.....	20
Figura 3.1 - Construção de uma dutovia com o processo manual e automatizado. (a) processo eletrodo revestido de forma manual e (b) processo MIG/MAG mecanizado	24
Figura 3.2 – Imagem de chanfro utilizado em soldagem TIG manual onde o posicionamento da junta está sendo mantido por um elemento de fixação ponteados	26
Figura 3.3 – Passe de raiz automatizado realizado em tubo de aço inoxidável com processo TIG.....	28
Figura 3.4 - Passe de raiz realizados com diferentes processos de soldagem a arco (a) MIG/MAG com controle de corrente (b) Processo TIG (c) MIG/MAG convencional	30
Figura 3.5 - Esquema das posições de soldagem dividida em setores. (S1) Posição Plana; (S2) Vertical Descendente; (S3) Sobre cabeça; (S4) Vertical Ascendente. ...	30
Figura 3.6 – Ilustração do equipamento AVC e representação da atuação do equipamento mediante a irregularidade na peça	32
Figura 3.7 – Exemplos de equipamentos dedicados à soldagem TIG orbital.....	34
Figura 3.8 – Transferência metálica não interrompida (ponte) no processo TIG alimentado. Taxa de aquisição: 1000 fps. Intervalo entre os <i>frames</i> : 23 ms.....	36
Figura 3.9 - Transferência metálica interrompida (ou intermitente) no processo TIG alimentado. Taxa de aquisição: 1000 fps. Intervalo entre os frames: 83 ms.....	36
Figura 3.10 – Transferência metálica instável com baixa velocidade de alimentação de arame	37
Figura 3.11 – Modelos comerciais de equipamentos TIG duplo-cátodo a) um arame de adição b) dois arames de adição.....	40
Figura 3.12 – Medição da distribuição da pressão de estagnação do arco com diferentes níveis de corrente (DEP: 3 mm, TIG-DE com 4 mm de afastamento entre os eletrodos).....	40
Figura 3.13 - Modelo comercial de tocha de soldagem TIG desenvolvidas para atuar com alto nível de corrente.	41

Figura 3.14 - Representação didática do modo operacional <i>keyhole</i> no processo plasma (PAW).....	42
Figura 3.15 - Defeitos decorrentes do processo plasma operando no modo <i>keyhole</i> (formação de cratera).....	43
Figura 3.16 - Perfil geométrico de cordões obtidos por <i>keyhole</i> com variados processos de soldagem	43
Figura 3.17 – Representação do aquecimento do arame por efeito Joule (modo <i>Hot wire</i>) em equipamento convencional, sem a presença do arco. Corrente no arame: 70 A.....	45
Figura 3.18 - Ilustração da movimentação do sistema de tracionamento de arame do equipamento TIPTIG e representação esquemática do comportamento da Va. (A1) Velocidade de avanço; (A2) velocidade de recuo do arame.	46
Figura 3.19 – Exemplos de aplicações do equipamento TopTIG, (a) soldagem de chapas de Inconel 718 com espessura de 1,5mm; (b) soldagem de estruturas da indústria automobilística	48
Figura 3.20 –Representação em corte da tocha e bocal TopTIG.....	49
Figura 3.21 - Comparação de acessibilidade entre (a) equipamentos TIG convencionais e (b) TopTIG	50
Figura 3.22 – Sistema <i>push-push</i> . a) controle de torque no cabeçote alimentador b) controle de velocidade de alimentação na tocha de soldagem TopTIG	51
Figura 3.23 - Comparação das regiões de inserção do arame do TIG convencional com o sistema TopTIG	52
Figura 3.24 – Cordão de solda realizado em todas as direções de alimentação de arame no arco, com o sistema comercial de alimentação tangencial	53
Figura 3.25 – Paredes fabricadas por manufatura aditiva por arco elétrico (<i>WAAM</i>) a) Processo MIG/MAG <i>Cold Metal Transfer</i> b) Processo TIG com alimentação tangencial	54
Figura 3.26 – Teste realizado em trajetória quadrada para conferir a flexibilidade de alimentação de arame por todos os lados do arco com alimentação tangencial.....	55
Figura 3.27 - Mapeamento das isotermas do arco, protegido com argônio puro.	56
Figura 3.28 – Relação da temperatura com as variáveis elétricas de soldagem (Corrente: 100A , Tensão: 15 V, Gás: Argônio).....	57
Figura 3.29 - Eficiência de fusão em função da distância eletrodo-peça	58

Figura 3.30 - Influência das posições de inserção de arame sobre a Va atingida com o sistema TOPTIG (tangencial) e TIG convencional (radial)	59
Figura 3.31 – Comparação entre diferentes processos de soldagem relacionando a taxa de fusão de arame com a potência média	59
Figura 3.32 - Influência das posições de inserção de arame sobre a geometria dos cordões: a) inserção frontal b) traseira c) lateral	60
Figura 3.33 – Cordões depositados sobre chapa em trajetória circular para evidenciar a influência da posição de inserção do arame em procedimentos de revestimento. a) Alimentação tangencial b) alimentação radial. 1) Lateral 2) frontal 3) lateral 4) traseira.	61
Figura 4.1 - Organograma simplificado com os principais procedimentos experimentais realizados	62
Figura 4.2 - Fontes de soldagem utilizadas: a) IMC / MTE Digitec 600 b) Air Liquide DC220	64
Figura 4.3 – Bancada com robô antropomórfico Motoman SIA10D e posicionador <i>Motopos</i>	65
Figura 4.4 – Montagem da tocha TopTIG no robô a) Configuração original; b) Configuração adaptada para soldagem orbital	66
Figura 4.5 – Detalhamento do bisel tipo J fabricado nos tubos para os testes de soldagem TIG orbital a) detalhamento do bisel b) junta montada	67
Figura 4.6 – Anéis seccionados dos tubos utilizados nos testes de soldagem TIG orbital	68
Figura 4.7 – Variação da corrente de soldagem do processo MIG/MAG convencional dentro de uma junta chanfrada	70
Figura 4.8 – Esquema representativo do sistema do controle de comprimento do arco TIG no procedimento orbital	71
Figura 4.9 – Metodologia de manipulação da tocha utilizada no procedimento de soldagem TIG orbital. P – Posição plana, V – Vertical, SC – Sobre cabeça	74
Figura 5.1 – Toque do eletrodo na poça de fusão sem a utilização do sistema de controle do comprimento do arco	77
Figura 5.2 – Representação da trajetória programada no robô com diferentes níveis de altura para verificação do comportamento da tensão em soldagem na posição plana	79

Figura 5.3 – Mapeamento do sinal da tensão realizado em soldagem plana com perturbações programadas na trajetória	79
Figura 5.4 – Mapeamento dos sinais da tensão realizado durante soldagem orbital dentro do chanfro. (Corrente: 220 A, Gás: Argônio, Vazão: 12 l/min)	81
Figura 5.5 - Modelo do projeto do bocal em ambiente CAD para estudo do ângulo de alimentação, evidenciando os extremos de regulagem (10 e 30°)	83
Figura 5.6 – Protótipo de bocal utilizado para analisar a influência do ângulo de inserção do arame no processo TIG	83
Figura 5.7 – Exemplos da aparência superficial dos cordões realizados com inserção de arame com 10° (cordão superior) e 30° (cordão inferior). Corrente: 200 A, Vs: 015 m/min, Va inicial 1m/min	85
Figura 5.8 – Cordões fabricados sobre chapa para avaliação das características geométricas referente ao ângulo de inserção de arame. Corrente: 200 A, Vs: 015 m/min, Va inicial 1m/min	85
Figura 5.9 – Limite operacional da transferência metálica utilizando o protótipo de ângulo variável	86
Figura 5.10 – Macrografias dos cordões de solda obtidos com a utilização do protótipo. Ângulos de inserção do arame: a) 15° b) 20° e c) 25°	87
Figura 5.11 – Desgaste do bocal TopTIG a) bocal desgastado b) bocal reparado ...	89
Figura 5.12 - Conceito construtivo do bocal desenvolvido. 1) <i>Gas Lens</i> ; 2) Eletrodo de Tungstênio; 3) Material de Adição (Arame); 4) Bocal; 5) Canal de Refrigeração	89
Figura 5.13 – Conjunto de fixação e proteção gasosa do bocal compacto através do sistema <i>gas lens</i> . (1) <i>Gas lens</i> , (2) Bucha isolante, (3) Suporte fixador do bocal (4) Corpo da tocha	90
Figura 5.14 - Projeto do bocal, com destaque para o canal de refrigeração. 1) Peça externa; 2) Anéis de vedação; 3) Peça interna.....	91
Figura 5.15 Conjunto de direcionamento do arame e refrigeração do bocal	92
Figura 5.16 – Representação da montagem completa do bocal. 1) Sistema de fixação; 2) Bocal; 3) Direcionador Lateral; 4) Inserto intercambiável; 5) Porca de fixação.	93
Figura 5.17 – Bocal refrigerado com alimentação tangencial sendo submetido aos testes de estanqueidade e refrigeração na soldagem plana	94
Figura 5.18 - Bancada montada com o Tartílope V4 e bocal compacto de ângulo reduzido para soldagem orbital	94

Figura 5.19 – Formação da poça de fusão no interior do tubo de aço inoxidável no modo <i>melt-in</i>	95
Figura 5.20 – Representação do <i>keyhole</i> durante a abertura do arco na soldagem do passe de raiz.....	96
Figura 5.21 – Rasgo formado na junta soldada no modo <i>keyhole</i>	97
Figura 5.22 – Aspecto superficial do cordão de solda do passe de raiz com os parâmetros iniciais da Tabela 3.....	98
Figura 5.23 – Exemplos de perfurações (<i>melt through</i>) ocorridas durante a soldagem TIG orbital.....	99
Figura 5.24 – Aspecto superficial superior e inferior do passe de raiz realizado com corrente constante no equipamento comercial.....	101
Figura 5.25 – Macrografias do passe de raiz realizado com corrente constante no equipamento comercial de alimentação tangencial (TopTIG)	102
Figura 5.26 - Desenho esquemático mostrando o efeito da posição da peça (em relação à horizontal) no perfil da solda evidenciando os efeitos das forças: eletromagnéticas (E) efeito Marangoni (termocapilar) (M) e a força gravitacional (g).	103
Figura 5.27 – Macrografias do passe de raiz na região sobre cabeça apresentadas por Paes, evidenciando a mesma presença de concavidade.....	104
Figura 5.28 - Macrografias do passe de raiz na região sobre cabeça (6h e 7h) apresentadas por Pigozzo evidenciando a presença de concavidade	105
Figura 5.29 – Macrografia da junta soldada na região sobre cabeça evidenciando a concavidade da raiz	105
Figura 5.30 – Soldagem sobre chapa ilustrando a contribuição da força por tensão superficial na poça de fusão puxando a ponte metálica no sentido contrário ao deslocamento da tocha	106
Figura 5.31 – Oscilograma dos sinais elétricos obtidos durante a soldagem do passe de raiz no procedimento TIG orbital	107
Figura 5.32 – Aspecto superficial da face e da raiz realizada com corrente pulsada no equipamento comercial	109
Figura 5.33 - Macrografias do passe de raiz realizada com corrente constante no bocal desenvolvido	111

Figura 5.34 – Ajustagem no bico intercambiável para facilitar a abertura do arco por toque na soldagem orbital. a) representação do problema b) modificação já concretizada.....	113
Figura 5.35 – Poça de fusão já solidificada na posição vertical utilizando a parametrização da Tabela 6 dos passes de preenchimento	115
Figura 5.36 – Defeito atingido na posição vertical utilizando os parâmetros da Tabela 6	115
Figura 5.37 – Oscilograma evidenciando o comportamento dos sinais de corrente, tensão e velocidade de arame, obtidos durante a soldagem de preenchimento.....	117
Figura 5.38 – Oscilação do sinal de tensão. A linha azul corresponde ao sinal da diferença de potencial entre o eletrodo e a peça. A linha vermelha corresponde ao sinal entre o eletrodo e o arame.....	119
Figura 5.39 – Aparência superficial característica dos passes de preenchimento fabricados com o sistema comercial TopTIG	120
Figura 5.40 – Aspecto da solda de acabamento completa realizada com o processo TIG com alimentação tangencial. a) Posição plana b) vertical e c) sobre cabeça...	121
Figura 5.41 – Resultado final da soldagem do tubo de aço inoxidável utilizando o sistema comercial de alimentação tangencial	122
Figura 5.42 – Exemplo de junta soldada com os parâmetros desenvolvidos para o equipamento comercial e transpostos para o bocal desenvolvido	123
Figura 5.43 – Resultado final da soldagem do tubo de aço inoxidável utilizando Tartílope V4, bocal desenvolvido e fonte IMC.....	125
Figura 5.44 – Aumento da V_a de forma gradual até o atingimento da instabilidade da transferência metálica (V_a média atingida: 3,5m/min).....	126
Figura 5.45 – Exemplo cordão de solda do passe de preenchimento com V_a de 3,5m/min.....	127
Figura 5.46 – Comparação da interação entre arco e arame no processo TIG. a) alimentação tangencial com 20° b) alimentação convencional com 45°	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química dos tubos de aço inoxidável 304 utilizados como corpos de prova.....	69
Tabela 2 – Dimensões médias dos cordões fabricados com o protótipo de ângulo de inserção variável	87
Tabela 3 – Parametrização inicial para a soldagem do passe de raiz utilizando o sistema comercial. (P) Plana; (V) Vertical; (SC) Sobre cabeça.....	97
Tabela 4 – Parametrização da soldagem orbital com corrente constante.....	100
Tabela 5 - Parametrização da soldagem orbital com corrente pulsada utilizadas no sistema comercial.....	109
Tabela 6 – Parametrização inicial para a soldagem de preenchimento da junta utilizando o sistema comercial.....	114
Tabela 7 – Parametrização utilizada na soldagem dos passes de preenchimento dos chanfros	117
Tabela 8 – Parâmetros de soldagem utilizados nos passes de acabamento	121
Tabela 9 – Parâmetros utilizados na soldagem com o bocal desenvolvido operando no modo <i>melt-in</i>	124

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

API	<i>American Petroleum Institute</i>
AVC	<i>Arc Voltage Control</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CCC	Curto-Circuito Controlado
CMT	<i>Cold Metal Transfer</i>
DEP	Distância Eletrodo-Peça
LABSOLDA	Laboratório de Soldagem da UFSC
LBW	<i>Laser Beam Welding</i>
MIG/MAG	<i>Metal inert/Active Gas</i>
P	Posição de Soldagem Plana
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PAW	<i>Plasma Arc Welding</i>
RMD	<i>Regulated Melted Deposition</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SAP	Sistema de Aquisição Portátil
SC	Posição de Soldagem Sobre Cabeça
STT	<i>Surface Tension Transfer</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
V	Posição de Soldagem Vertical
Va	Velocidade de Alimentação de Arame
Vs	Velocidade de Soldagem
WAAM	<i>Wire Arc Additive Manufacturing</i>

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	18
2.	OBJETIVOS	22
2.1	OBJETIVO GERAL	22
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
3.1.	SOLDAGEM ORBITAL	24
3.2.	PROCESSO DE SOLDAGEM TIG	35
3.3.	VERSÕES E MODOS DE OPERAÇÃO DO PROCESSO TIG.....	38
3.3.1	Variações Construtivas e Modos Operacionais	39
3.3.2	Variações na Alimentação de Material de Adição	43
3.4	SISTEMA TOPTIG	47
4.	METODOLOGIA	62
4.1	EQUIPAMENTOS	63
4.2	MATERIAIS	67
4.3.	MÉTODOS	69
4.3.1	Necessidades Tecnológicas e Implementações	69
4.3.2	Procedimentos de Soldagem	72
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
5.1	IMPLEMENTAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA DE CONTROLE DO COMPRIMENTO DO ARCO TIG EM UM ROBÔ ANTROPOMÓRFICO	76
5.1.1	Desempenho do Controlador do Comprimento do Arco TIG no Manipulador Robótico	78
5.2	DESENVOLVIMENTO DE UM BOCAL TIG COMPACTO COM ÂNGULO REDUZIDO DE INSERÇÃO DE ARAME.....	82
5.2.1	Protótipo Desenvolvido Para Avaliar a Influência do Ângulo de Inserção de Arame	82
5.2.2	Fabricação e Montagem do Bocal TIG Compacto	88
5.3	SOLDAGEM TIG ORBITAL	95
5.3.1	Soldagem do Passe de Raiz	95
5.3.2	Soldagem de Preenchimento	112
6	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	129
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	133
	REFERÊNCIAS	131

1. INTRODUÇÃO

Inovações tecnológicas contemplam toda e qualquer mudança em determinado processo ou produto. Através da inovação é possível aperfeiçoar tecnologias já existentes ou, até mesmo, introduzir novos conceitos no mercado (BARBIERI, 1990). Em outras palavras, inovação é a capacidade de romper as fronteiras do conhecimento pela sociedade, quebrando paradigmas intelectuais impostos ao longo do tempo. No âmbito brasileiro, os diferentes projetos de P&D (Pesquisa e Desenvolvimento) contribuem de forma significativa nestes avanços, sendo que uma grande parte deles é impulsionada pelo setor de energia. De acordo com o plano de negócios e gestão 2019-2023 da Petrobras, 14 % do total de investimentos da empresa no setor de exploração e produção são dedicados à Infraestrutura e P&D, uma fatia que corresponde a, aproximadamente, 9,6 bilhões de dólares (PETROBRAS, 2018). Neste cenário de investimento em desenvolvimento tecnológico e dentro das linhas de pesquisa da engenharia, estão inseridos diversos processos de fabricação, como o estudo de tecnologias para a soldagem de tubulações de petróleo e gás, por exemplo. Apesar dos avanços e geração de conhecimento tecnológico proporcionados pelos trabalhos de pesquisa, existe um caminho longo até que os novos processos e técnicas possam ter um nível de desenvolvimento suficiente para aplicação em campo. Especialmente no Brasil, a montagem das dutovias na maior parte das vezes não faz uso das novas tecnologias, sendo ainda realizados por soldadores de forma manual e, especialmente, com o processo Eletrodo Revestido ou com o processo TIG manual para fazer a raiz em uma configuração de junta com grande abertura. Nesse sentido, o procedimento de soldagem das tubulações que transportam o petróleo e o gás natural pode se tornar um dos gargalos na produção e na construção das plataformas, sondas e refinarias que processam a matéria-prima. Além disso, a necessidade de maior competitividade em um mercado global, exige que o setor brasileiro de energia melhore continuamente.

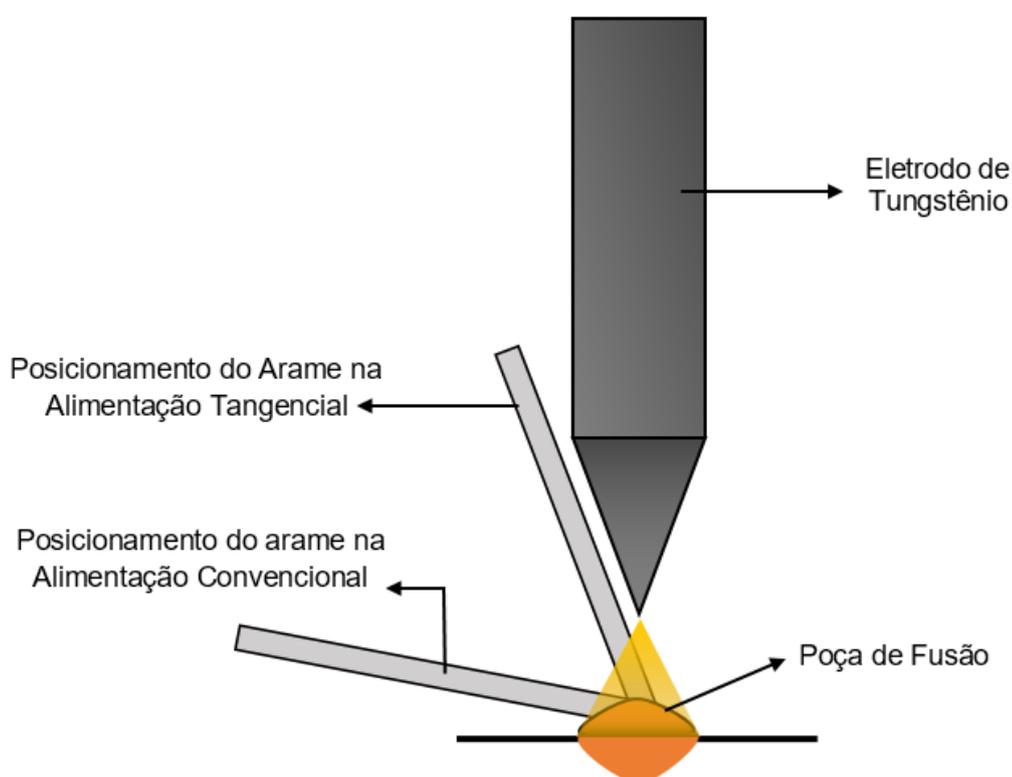
Desse modo, justifica-se a intensa busca por melhorias não somente nos processos e técnicas de soldagem como também em sua automação. É neste contexto, que se insere o Laboratório de Soldagem da UFSC (LABSOLDA), o qual tem buscado contribuir com esta área de pesquisa através de investigações em

procedimentos de soldagem de elevada produtividade e desenvolvimento de equipamentos.

É possível afirmar que os processos MIG/MAG e TIG convencionais são os processos a arco mais aplicados no setor industrial brasileiro. Apesar de figurarem na indústria há muito tempo, constantemente estão sendo desenvolvidas novas variantes tecnológicas de cada um, ou seja, são realizadas modificações em relação aos aspectos construtivos e de controle que transformam estes processos convencionais em versões especiais. A título de exemplo, atualmente é possível controlar a transferência metálica através da manipulação da corrente de soldagem (formato de onda), como nos variados processos MIG/MAG usando curto-circuito controlados (RMD, STT, CCC), bem como, modificar a forma da alimentação de material de adição, como nos casos do MIG e TIG com alimentação dinâmica (CMT e TipTIG). Nesses casos, a principal inovação consiste no movimento de avanço e recuo do arame. Assim, se busca a adaptação do processo de soldagem diante à demandas específicas, as quais justificam um maior investimento em termos tecnológicos (SCOTTI e PONOMAREV, 2014).

Nesse contexto de estudo e desenvolvimento de novas variantes dos processos tradicionais, umas das tecnologias do processo TIG que apresenta potencial para aumento de produtividade na soldagem orbital de dutos é a tecnologia TIG com alimentação tangencial, podendo ser encontrada com o nome comercial TopTIG, primeiramente comercializada pela empresa *Air Liquide* e atualmente pela *Lincoln Electric*. Esta tecnologia, viabilizada por um bocal especial, é caracterizada principalmente por permitir a inserção de arame em uma região mais próxima ao eletrodo de tungstênio e de forma paralela ao ângulo de afiação. A Figura 1.1 ilustra a principal diferença entre um processo TIG com alimentação convencional e outro com alimentação tangencial.

Figura 1.1 – Ilustração da diferença entre alimentação tangencial e convencional no processo TIG



Fonte: O autor

Cabe ressaltar que as informações obtidas sobre a aplicação e desempenho da alimentação tangencial, até então, são relativamente novas, sendo que os primeiros artigos científicos encontrados na literatura são datados do ano de 2008 e pertencem, na sua totalidade, ao mesmo grupo de pesquisadores. Além disso, por se tratar de uma tecnologia muito recente, os trabalhos científicos abordando essa variante tecnológica do TIG são escassos. As informações divulgadas pelo fabricante (AIR LIQUIDE WELDING, 2008), afirmam que é possível atingir o desempenho similar ao MIG/MAG, devido a posição em que o arame é alimentado no processo e como consequência disso se obtém o aumento de produtividade do TIG. Essas informações evidenciam que a técnica de alimentação tangencial do sistema comercial TopTIG apresenta pleno potencial quanto à soldagem automatizada de chapas finas de aço inoxidável em velocidades de soldagem mais elevadas e revestimento metálico com ligas de níquel. As principais vantagens estão relacionadas ao projeto da tocha, o qual, segundo o fabricante, permite o aumento da taxa de fusão de arame, uma vez que o arame é inserido em uma região do arco com maior temperatura. A operação do

equipamento é facilitada em decorrência das dimensões reduzidas do bocal e pelo fato de possuir um alimentador de arame integrado ao corpo. Na soldagem orbital, onde praticamente todo o equipamento se move em torno do tubo, essa característica pode ser uma vantagem em potencial, além, é claro, da vantagem pelo aumento da taxa de fusão. Assim, todos os elementos são mantidos afixados, eliminando os riscos de desajustar as configurações iniciais de posicionamento, evitando, por exemplo, o desalinhamento entre o arame de adição e o eletrodo. Por outro lado, as informações são ainda providas quase exclusivamente por fabricantes, o que as compromete em termos de imparcialidade e visão científica. Nesse contexto, o trabalho se propõe a estudar o processo TIG com alimentação tangencial voltado para a aplicação em soldagem orbital de tubos.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho encontra-se inserido dentro de uma linha de pesquisa do LABSOLDA que visa estudar novas variantes, técnicas e processos para soldagem TIG orbital. Nesse contexto, o objetivo geral do trabalho é estudar de modo qualitativo o desempenho da versão do processo TIG com alimentação tangencial e sua aplicação em relação à soldagem mecanizada de união de dutos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Aplicar o sistema comercial de alimentação tangencial denominado TopTIG na soldagem de união de tubulações de aço inoxidável, com o intuito de verificar o seu desempenho e principais características operacionais diante dessa aplicação;
- Projetar, fabricar e testar um dispositivo com ângulo de inserção de arame variável. Este dispositivo terá quatro ângulos de inserção distintos, para que seja possível estudar e avaliar de forma qualitativa e quantitativa as faixas operacionais de alimentação de arame em cada ângulo disponível no equipamento, bem como a influência dessa variação angular no processo de forma geral;
- A partir do objetivo anterior, construir, aplicar e avaliar um bocal TIG com alimentação tangencial, de modo a disponibilizar um sistema composto flexível (bocal e direcionador de arame integrados), com subsistemas intercambiáveis possibilitando assim a manutenção independente dos conjuntos, sem a necessidade de substituição completa do bocal;
- Estudar as metodologias para realização do passe de raiz na soldagem TIG orbital com alimentação tangencial com os equipamentos comercial e desenvolvido;
- Estudar e avaliar os limites operacionais relacionados ao aumento da produtividade do processo TIG orbital no que se refere às taxas

de deposição de material durante a realização dos passes de preenchimento dos chanfros, de maneira controlada, objetivando a realização de soldas sem defeitos;

- Aplicar e avaliar a utilização de um robô antropomórfico na soldagem TIG orbital, com a finalidade de entender as suas vantagens e limitações, sugerindo e realizando melhorias e customizações para o seu correto funcionamento e melhor desempenho no procedimento orbital.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. SOLDAGEM ORBITAL

As descobertas no pré-sal estão entre as mais importantes do setor de energia em todo o mundo na última década. Esta é uma realidade que coloca o país em uma posição estratégica frente à grande demanda de energia mundial (PETROBRAS, 2019). No que diz respeito ao transporte dos produtos, a malha dutoviária, quando comparada ao transporte rodoviário, permite ganhos ambientais expressivos em função de maior flexibilidade, aumento da segurança operacional, redução do número de acidentes e vazamentos e do volume de emissões atmosféricas (PETROBRAS, 2018). Este sistema pode transportar diferentes matérias-primas e podem ser classificados de acordo com a substância transportada, por exemplo, gasodutos, oleodutos, minerodutos, carbodutos e polidutos, bem como, ser classificado de acordo com a localização de sua construção, como subterrâneos, aparentes, aéreos e submarinos. As tubulações são empregadas desde a extração e transporte até o processamento e distribuição destes produtos. Elas fazem o óleo chegar até as refinarias e ajudam na hora de escoar a produção (PETROBRAS, 2018). Neste contexto, a maioria dos processos de fabricação, além de atuarem de forma direta na montagem, exercem um papel essencial nas manutenções e reparos do sistema dutoviário (Figura 3.1 a), tanto em instalações denominadas *On-shore*, situadas no meio terrestre, quanto *Off-shore*, localizadas em alto mar.

Figura 3.1 - Construção de uma dutovia com o processo manual e automatizado. (a) processo eletrodo revestido de forma manual e (b) processo MIG/MAG mecanizado

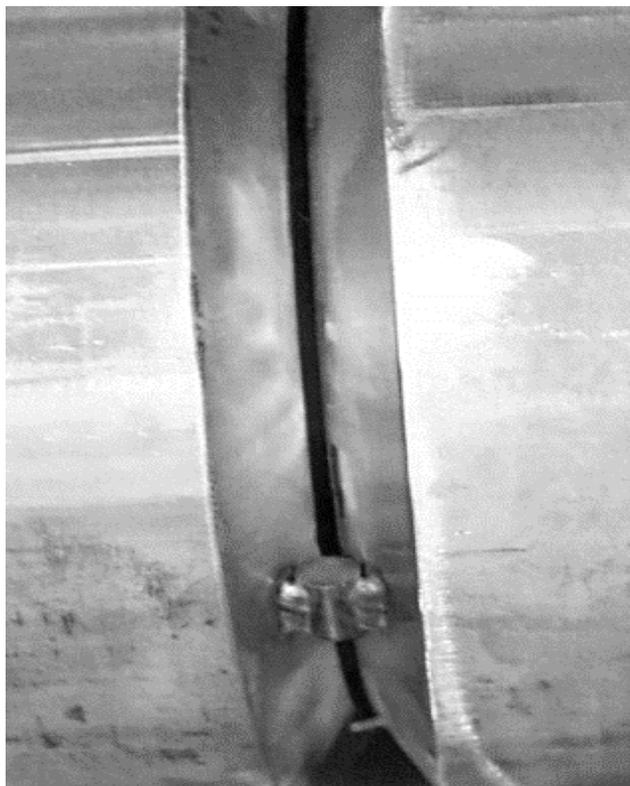


Fonte: <http://www.techageinternational.in/Engg.php>; <https://www.ogpe.com/index.html>

Os processos de soldagem quando operados de forma mecanizada, e quando bem aplicados, além de proporcionarem uma produtividade muito maior considerando o tempo de arco aberto, por exemplo, tendem a apresentar maior repetibilidade das características da solda. Por outro lado, os processos manuais, podem oferecer maior agilidade no que diz respeito à montagem e emprego imediato do equipamento, sobretudo devido ao menor número de variáveis de configuração e componentes. Contudo, a necessidade de profissionais qualificados para executá-los pode ser um obstáculo a ser enfrentado, especialmente durante os picos de produção em uma obra ou construção de *pipelines*. Este fator colabora para que a indústria busque métodos alternativos para executar suas operações de soldagem, como a mecanização, ilustrada na Figura 3.1b (CHOWDARY, MAHARAJ e LEWIS, 2010). Além disso, a automatização dos procedimentos pode ser considerada como uma alternativa para reduzir as condições insalubres de trabalho, enfrentadas pelos soldadores na maioria das vezes.

A soldagem orbital mecanizada consiste na realização do procedimento de soldagem em toda a circunferência do tubo, sobre a qual a tocha realiza um movimento de órbita, deslocada com o auxílio de manipuladores robóticos e cabeçotes orbitais dedicados, sobre trilhos (Figura 3.1 b). Em aplicações de soldagem orbital mecanizada considera-se como um dos principais desafios a realização do passe de raiz, que consiste no primeiro passe para realizar a união dos tubos. Nesta etapa, manter a poça de fusão de maneira estável e controlada, especialmente em condições desfavoráveis, é uma tarefa extremamente complexa, pois, dependendo da posição do tubo, a gravidade contribui negativamente. Por esse motivo, é necessário conceber estratégias que garantam a estabilidade da poça dentro do chanfro (SARTORI, 2017). Na soldagem TIG manual, uma das estratégias adotadas para que o soldador consiga fazer a raiz de forma satisfatória, é a utilização de grandes ângulos de abertura da junta (entre 60° e 80°), permitindo um fácil acesso até o fundo da junta. Da mesma forma também é grande a abertura da raiz, normalmente até 5 mm, significando assim, maior facilidade de se obter a raiz com geometria adequada, mas nesse caso, a necessidade de adicionar uma grande quantidade de material consequentemente limita a produtividade do processo. A Figura 3.2 ilustra uma junta característica utilizada na soldagem TIG manual com abertura de raiz e chanfro V.

Figura 3.2 – Imagem de chanfro utilizado em soldagem TIG manual onde o posicionamento da junta está sendo mantido por um elemento de fixação ponteadado



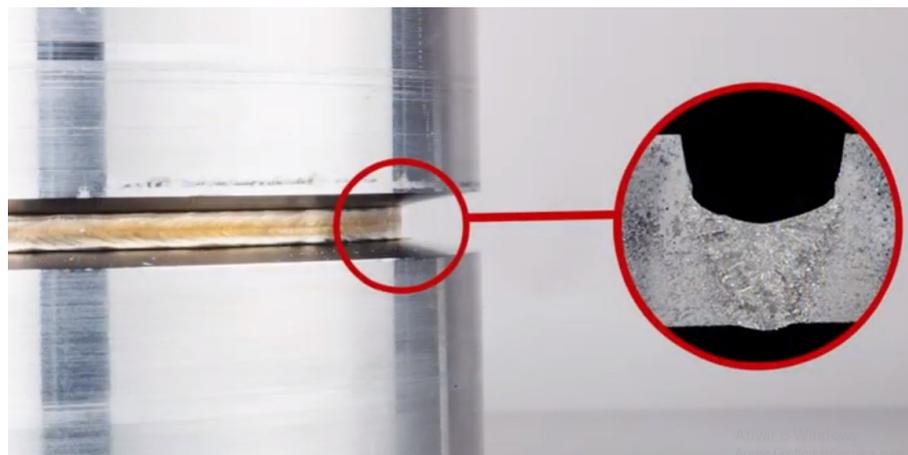
Fonte: <https://www.mig-welding.co.uk/>

Durante o estágio de preparação, a junta fabricada pode conter deformidades variadas como aberturas de raiz irregulares, desnivelamentos entre as faces da raiz dos tubos (*high-low*), chanfro fabricado fora da especificação de projeto (o que pode variar o tamanho da abertura e a localização da junta) ou até mesmo excentricidade do próprio tubo (ovalização). Tais circunstâncias podem ser corrigidas pelo soldador quando o procedimento é realizado de forma manual, porém, quando a soldagem é mecanizada e existe uma trajetória previamente definida, muitas vezes o equipamento manipulador da tocha não consegue identificar e nem corrigir essas variações. Para atenuar os efeitos dessa problemática, existem hoje alguns tipos de sensores e estratégias capazes de possibilitar o reajuste automático da trajetória programada da tocha de soldagem (MENDONÇA, 2013). Um exemplo é a utilização do feixe laser como sensor para identificar variações na junta e informar o manipulador para que, desta forma, seja controlada a posição da tocha. Porém, essas tecnologias, além do custo elevado, também apresentam certa complexidade para implementação e utilização, oferecendo ainda muitos desafios para que de fato possam ser utilizadas em campo.

Há algum tempo, outros processos que não utilizam o arco como fonte de energia, estão sendo investigados, com o intuito de melhorar a eficiência e a operacionalidade da soldagem orbital, como o Laser, soldagem por pressão e indução (BLACKMAN e DORLING, 2000) (YAPP e BLACKMAN, 2004). Mesmo assim, o MIG/MAG mecanizado ainda é o processo mais empregado em tubulações de grande diâmetro (BLACKMAN e DORLING, 2000) (YAPP e BLACKMAN, 2004). Estes autores também discutem sobre uma série de desenvolvimentos que aumentam a produtividade nesse processo, como versões com curto-circuito controlado e utilização de corrente alternada (CA). Considerando o número de publicações sobre o processo MIG/MAG aplicado em soldagem orbital, fica evidente a sua maior popularidade na realização deste procedimento, o que recai sobretudo nas características de maior taxa de deposição e a menor sensibilidade a pequenos desvios na geometria das juntas em comparação com o processo TIG (SARTORI, 2017) (MENDONÇA, 2013) (BLACKMAN e DORLING, 2000) (YAPP e BLACKMAN, 2004) (KINDERMANN, 2016) (ADI, ISMAR e PETAR, 2016) (CUEHL, 2008). Assim, para soldagem de dutos de aço carbono, o MIG/MAG se apresenta como a solução ideal. É neste contexto que diversas versões do MIG/MAG foram desenvolvidas, especialmente as versões com curto-circuito controlado. Por outro lado, se observa em grande parte das aplicações industriais que o processo TIG é requerido especialmente na soldagem de ligas especiais, como as de níquel e aços inoxidáveis, onde o desempenho do MIG/MAG ainda não é considerado adequado. Além disso, apesar das possibilidades do MIG/MAG, o processo TIG ainda é preferido, devido à maior facilidade de obtenção de soldas livres de defeitos de falta fusão.

Sob a ótica de desempenho econômico e produtivo na soldagem orbital, são determinantes, sobretudo, dois principais aspectos do método de soldagem dos dutos: a velocidade de soldagem do passe de raiz (Figura 3.3) e a taxa de deposição nos passes de enchimento. Naturalmente, como consequência, estes fatores controlam a construção da dutovia e o número de estações necessárias para manter o ritmo da obra (YAPP e BLACKMAN, 2004). Entre outros fatores, os pontos mais importantes os quais tornam o passe de raiz uma etapa crítica do procedimento, estão relacionados à espessura adequada da raiz para manter a integridade mecânica da estrutura soldada (KINDERMANN, 2016). Para tanto, existem algumas normas técnicas para a inspeção da soldagem do passe de raiz (A.P.I 1104 , 2005).

Figura 3.3 – Passe de raiz automatizado realizado em tubo de aço inoxidável com processo TIG



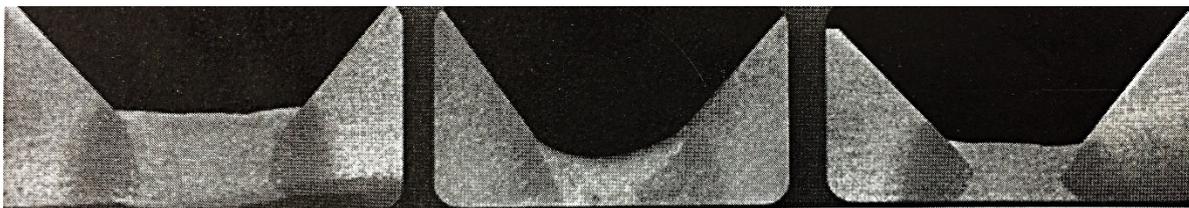
Fonte: (FRONIUS, 2017)

Considerando o aumento da produtividade, traduzido neste caso por velocidade de soldagem e espessura da raiz, algumas pesquisas procuram comparar e evidenciar a capacidade que os processos possuem para realizar esta operação. Embora, muitas vezes, os resultados apresentados em trabalhos científicos não representem, de fato, a real capacidade dos processos. Adi, Ismar e Petar (2016) compararam a soldagem do passe de raiz em aço carbono com os processos TIG, ER e MIG/MAG utilizando uma versão comercialmente denominada como “STT” (*Surface Tension Transfer*). Este último se refere a uma modalidade desenvolvida pelo fabricante de equipamentos de soldagem *Lincoln Electric* que utiliza a Tecnologia de Controle de Forma de Onda (*Wave Form Control Technology*™) para controlar a corrente (LINCOLN ELECTRIC, 2018). Os resultados do trabalho de Adi, Ismar e Petar, (2016), mostraram que com a versão STT foi possível realizar o passe de raiz com velocidades de soldagem três vezes maiores em relação ao TIG e ER. Além disso, os valores medidos da geometria do cordão, apresentaram dimensões duas vezes maiores em relação aos cordões realizados com os demais processos. Porém, o autor não evidencia se os procedimentos foram realizados de forma manual ou por um manipulador robótico, e nem mesmo mostra macrografias das soldas realizadas. Desta forma, o estudo abre precedentes para questionamentos em relação à influência do operador nesses testes. Em contrapartida, Sartori (2016) realizou diversos experimentos utilizando, entre outras versões do MIG/MAG, duas versões com curto-circuito controlado, o CCC (Curto-Circuito-Controlado/IMC Soldagem) e o STT, aplicados na soldagem orbital automatizada. O autor expõe ainda uma ampla

discussão sobre as vantagens da utilização destas versões do MIG/MAG, entre elas o controle da poça de fusão em posições desfavoráveis, fora da posição plana. No trabalho, o resultado de maior relevância, foi o desenvolvimento de EPS (Especificação de Procedimento de Soldagem) que garantem a repetibilidade e a confiabilidade dos procedimentos de soldagem desenvolvidos com as referidas versões utilizadas, tornando-os robustos. Assim, o que se pretende com esta discussão é evidenciar a importância de se deixar muito claros todos os parâmetros e em que circunstâncias os procedimentos são realizados e comparados, para que não haja interpretações equivocadas acerca da operacionalidade dos diferentes processos.

Com relação à soldagem TIG orbital, esta começou a ser empregada na década de 1960 pela indústria aeronáutica, devido à necessidade de aumentar a confiabilidade das soldas realizadas nas linhas hidráulicas das aeronaves (MANNION e HEINZMAN, 1999). Embora o MIG/MAG hoje seja amplamente utilizado na soldagem orbital, o emprego do processo TIG na fase do passe de raiz, executada geralmente de forma manual por soldadores, tende a garantir uma solda com menor susceptibilidade à ocorrência de defeitos nesta região da junta. Isto acontece porque o soldador consegue dosar quando é indispensável inserir o metal de adição, fundindo somente o metal de base. Esta é uma grande vantagem do TIG, pois, quando necessário, o soldador pode simplesmente realizar uma refusão do material depositado, eliminando alguma descontinuidade presente como falta de fusão. No MIG/MAG isto é impossível, uma vez que o material está sendo continuamente alimentado. Com o auxílio da Figura 3.4, é ilustrada uma comparação da soldagem do passe de raiz realizado com os processos MIG/MAG e TIG.

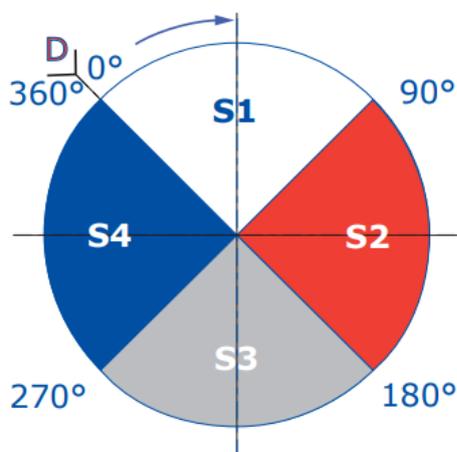
Figura 3.4 - Passe de raiz realizados com diferentes processos de soldagem a arco (a) MIG/MAG com controle de corrente (b) Processo TIG (c) MIG/MAG convencional



Fonte: (CUEHL, 2008)

Estudos com o processo TIG orbital foram realizados no LABSOLDA/UFSC (PIGOZZO, 2015) (PAES, 2016) (RIFFEL, 2018). Utilizando equipamentos dedicados à soldagem orbital, os trabalhos demonstraram a potencialidade deste processo em procedimentos de passe de raiz de forma automatizada. Todos estes autores utilizaram a metodologia de determinação das posições de soldagem (plana, vertical e sobre cabeça), conforme a disposição das horas de um relógio de ponteiros e na sequência: posição plana, posição vertical com progressão descendente da tocha para a posição sobre cabeça, algo comumente empregado. Informações relativas às posições de soldagem nos procedimentos orbitais, podem ser encontrados na norma da *American Welding Society* (ANSI/AWS A3.0-94, 1994). Trata-se da norma que aborda os termos e definições para processos de soldagem, brasagem e corte térmico. Contudo, de maneira mais simplificada e objetiva, é possível mostrar as posições de soldagem de acordo com setores, conforme Figura 3.5.

Figura 3.5 - Esquema das posições de soldagem dividida em setores. (S1) Posição Plana; (S2) Vertical Descendente; (S3) Sobre cabeça; (S4) Vertical Ascendente.

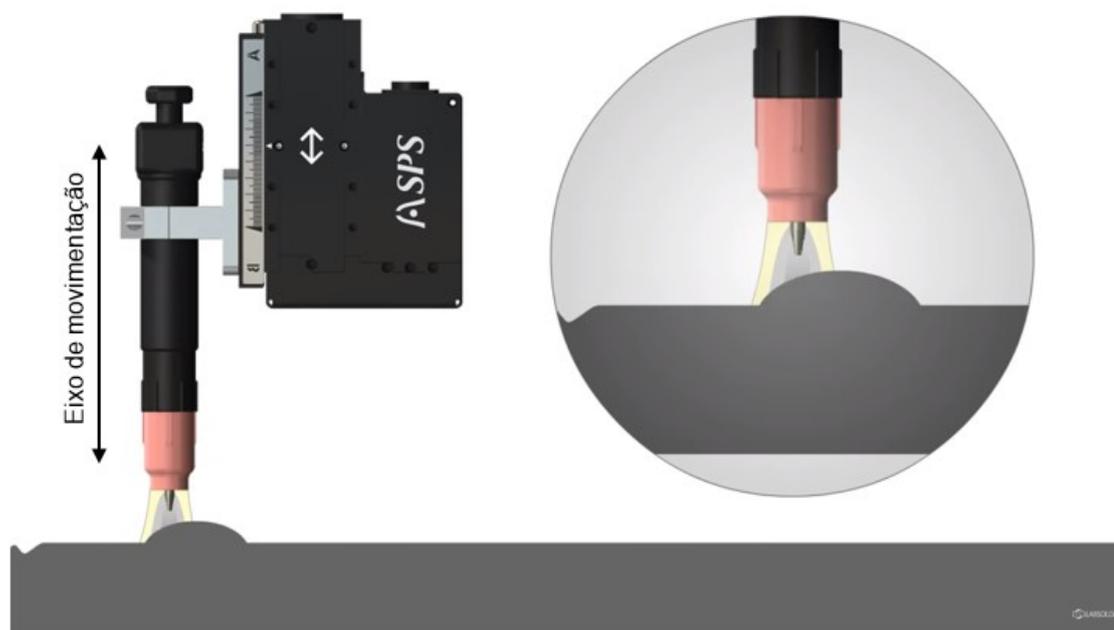


Fonte: (POLYSOUDE, 2016)

As condições da poça de fusão podem variar muito ao longo da junta. Por exemplo, a poça pode aumentar de tamanho em regiões fora da posição plana ocasionando escorrimentos do material fundido e contribuindo com a ocorrência de defeitos. Isso ainda deve ser correlacionado com as demais variáveis envolvidas, como diâmetro do tubo, processo e níveis de potência utilizados, as quais afetarão também os efeitos mecânicos como tensões residuais e distorções, causados pelo gradiente de temperatura na peça. Choudary et al. (2010) realizaram um estudo da soldagem do passe de raiz com o processo TIG mecanizado, onde foram soldados tubos de aço-carbono de 8 e 10 polegadas de diâmetro, com chanfro V na progressão ascendente. No trabalho os autores perceberam que para garantir a integridade da raiz, a corrente média e a velocidade de alimentação necessitaram ser alteradas ao longo da trajetória da junta de forma mais significativa nos tubos de menor diâmetro. Em contrapartida, nos tubos de maior diâmetro (10 polegadas) a corrente média foi mantida constante em 160 A. Isso mostra que, conforme a necessidade, os valores dos parâmetros de soldagem devem ser alterados dependendo dos setores definidos. Na prática, na maioria das vezes os setores não são divididos regularmente como mostrado na Figura 3.5. Além disso, e dependendo do equipamento disponível, o número de setores também pode variar devido às diferentes aplicações de soldagem (POLYSOUDE, 2016).

No trabalho realizado por Pigozzo (2015), foram soldados tubos de aço-carbono SAE 1020 com diâmetro nominal de 406,4 mm (16 polegadas) e espessura de parede de 12,7 mm (meia polegada), chanfro em U e com face de raiz (nariz) de 2mm. Neste caso, um importante resultado foi obtido. Trata-se da realização da soldagem em 360° com a alteração dos parâmetros e sem a necessidade de paradas do processo. As principais conclusões deste trabalho inferem sobre a importância da utilização de um sistema que monitore e corrija o valor da tensão do processo a partir de um valor de referência previamente regulado, mediante a modificação da posição da tocha em relação à peça, o AVC (*Arc Voltage Control*). Normalmente, o AVC é requisitado em situações em que a peça possui irregularidades na superfície. Um exemplo de equipamento, é representado na ilustração da Figura 3.6.

Figura 3.6 – Ilustração do equipamento AVC e representação da atuação do equipamento mediante a irregularidade na peça



Fonte: (SPS Soldagem, 2019)

Considerando que a corrente elétrica é definida como fluxo ordenado de partículas portadoras de carga elétrica ou o próprio deslocamento de cargas dentro de um condutor, por analogia, a tensão elétrica pode ser representada pela força responsável por tal movimentação. Em um arco elétrico de soldagem, para uma mesma corrente elétrica regulada na fonte (comando de corrente), aumentando-se o comprimento do arco, é esperado que o valor da tensão também aumente. Este é um reflexo do aumento na diferença de potencial elétrico entre os dois pontos (eletrodo e peça). Nesse contexto, se o comprimento do arco não for controlado, isso implicará em variação da concentração de energia entregue à poça, podendo assim, contribuir tanto para perfuração da junta em comprimentos menores do arco, devido a maior densidade de corrente, quanto para falta de penetração, em comprimentos maiores do arco, além de provocar colisões do eletrodo com a peça.

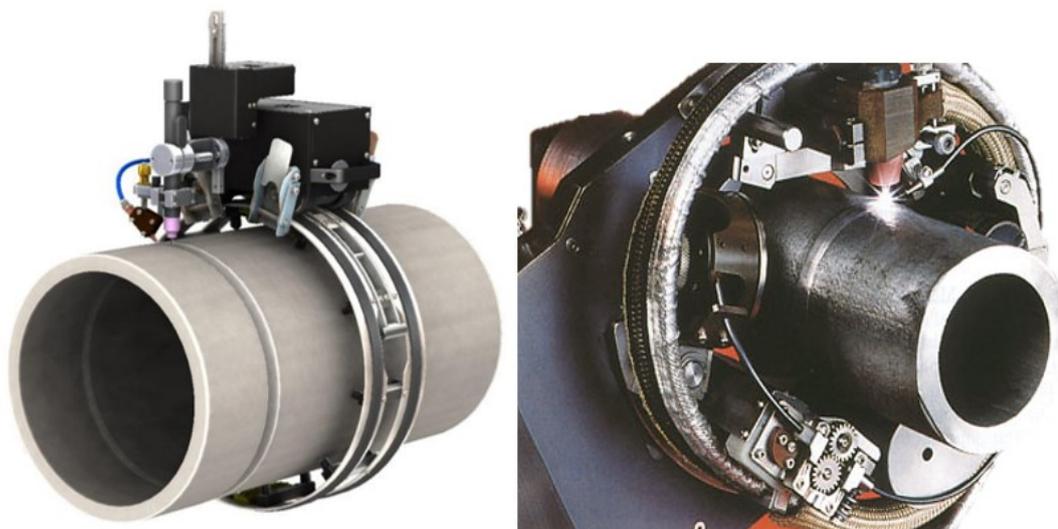
No processo TIG, a fonte de soldagem controla a corrente, portanto a tensão é uma variável livre para oscilar durante o processo sendo o seu valor diretamente proporcional ao comprimento do arco. Assim, quanto maior o comprimento maior será a potência do arco para a mesma corrente. Entretanto, neste caso, a potência não deve ser a única premissa considerada em termos de eficiência de fusão, pois as perdas de calor por radiação e convecção principalmente, aumentam

conforme aumenta-se o comprimento do arco. Além disso, a densidade de corrente é maior em comprimentos menores de arco. Dessa forma, a alteração da potência aliada à influência da gravidade pode variar também as características geométricas do passe de raiz.

Outro fator que pode ser considerado crítico na soldagem orbital, está relacionado à garantia de estabilidade na alimentação do arame. Naturalmente, na soldagem orbital, o conduíte assume diferentes configurações ou posturas ao longo da soldagem. Paes (2016), discute em sua pesquisa com TIG orbital sobre intercorrências relacionadas à alimentação do arame, principalmente no passe de raiz onde a velocidade do arame é baixa. Com a utilização de técnicas como alimentação dinâmica — movimento de avanço e recuo do arame gerado no cabeçote alimentador — este autor concluiu que a disposição do conduíte influencia diretamente na alimentação do arame quando o conduíte está dobrado, comparado à disposição em linha reta. Sem dobras, o arame avançou e recuou com amplitude muito maior quando comparados à disposição do conduíte dobrado. Nessa etapa, um dos problemas mais comuns enfrentados é o travamento do arame, devido ao efeito *stick-slip*, o qual será relatado no item 3.4. Este fator ocasiona instabilidade na transferência metálica e, na maioria das vezes, contribui para a contaminação do eletrodo de tungstênio, sendo este um fator catastrófico para o procedimento.

Atualmente, as versões construtivas de equipamentos para a soldagem TIG orbital são muito amplas e distribuem-se em diversos fabricantes. Alguns exemplos são ilustrados na Figura 3.7.

Figura 3.7 – Exemplos de equipamentos dedicados à soldagem TIG orbital



Fonte: (PAES, 2016); <http://www.arcmachines.com/>

Apesar da existência de diferentes fabricantes no mundo de equipamentos dedicados à soldagem orbital automatizada, no Brasil, a soldagem de tubulações continua sendo realizada, na maioria das vezes, de forma manual utilizando o processo TIG e o eletrodo revestido para o passe de raiz. Este último também pode ser empregado no preenchimento dos chanfros (SARTORI, 2017).

Deste modo, a principal conclusão a respeito da soldagem mecanizada se deve ao fato desta apresentar potencialidade elevada para realizar os procedimentos orbitais, a partir dos trabalhos já realizados. Além disso, a automatização dos processos de soldagem tende na maioria das vezes, a apresentar maior repetibilidade dos procedimentos e produtividade, tendo em vista que o número de paradas é muito menor, realizando a soldagem em 180° sem parar. Nesse contexto de soldagem automatizada, o presente trabalho se propõe a estudar especificamente a variante TIG com alimentação tangencial. A seguir, serão apresentados alguns aspectos de ordem tecnológica do processo TIG e demais relacionados às inovações nos equipamentos e nos modos de operação do referido processo.

3.2. PROCESSO DE SOLDAGEM TIG

O processo de soldagem TIG se baseia na fusão de material utilizando-se da energia fornecida por um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a peça de trabalho. Neste processo, uma cortina de gás inerte tem a função de proteger o eletrodo não consumível e a poça de fusão contra os efeitos da oxidação causada pelo ar atmosférico, contribuindo assim, para um cordão livre de defeitos e com uma excelente aparência superficial. Na maior parte das vezes, o gás utilizado é o Argônio, uma vez que além do menor custo e da função de proteção, este gás torna mais fácil a abertura e estabilidade do arco, pois possui menor potencial de ionização em relação a outros gases utilizados, como o hélio por exemplo. Esta característica físico-química facilita a ionização do gás (retirada de elétrons do átomo). Neste caso, o gás acaba desempenhando outra função, de contribuir com a abertura e estabilidade do arco elétrico não somente no TIG, como também nos demais processos de soldagem a arco. A alimentação de material de adição no processo TIG acontece por meio da inserção manual de varetas ou de forma automática por sistemas alimentadores de arame. Além disso, o diferencial vantajoso deste processo está atrelado à possibilidade da realização do procedimento de soldagem sem a utilização de material de adição, denominado como soldagem TIG autógena. Normalmente, o tipo de corrente de soldagem utilizada no TIG é CC- (corrente contínua na polaridade direta), aplicada de forma constante ou pulsada, onde a tocha é conectada ao polo negativo da fonte e a peça ao polo positivo, proporcionando a soldagem da maioria dos materiais e ligas metálicas soldáveis. Contudo, é possível utilizar diferentes configurações de corrente, como a corrente alternada, sendo esta, utilizada principalmente na soldagem de ligas de alumínio ou magnésio.

A relação da potência do arco e da velocidade de arame (V_a), possui influência significativa no processo TIG alimentado sendo necessário adequar estas variáveis para obter um determinado modo de transferência metálica. (FIGUEIRÔA, 2015). Operando-se o processo com a alimentação automática de arame, a transferência metálica acontece majoritariamente de duas formas. Quando o material é depositado continuamente na poça de fusão formando uma “ponte metálica” (entre o arame de adição e a poça), de material fundido com espessura similar ao diâmetro do arame, denomina-se transferência por toque não-interrompida (ponte) conforme

ilustrado na Figura 3.8. Neste tipo de transferência de material, a tensão superficial contribui de forma importante.

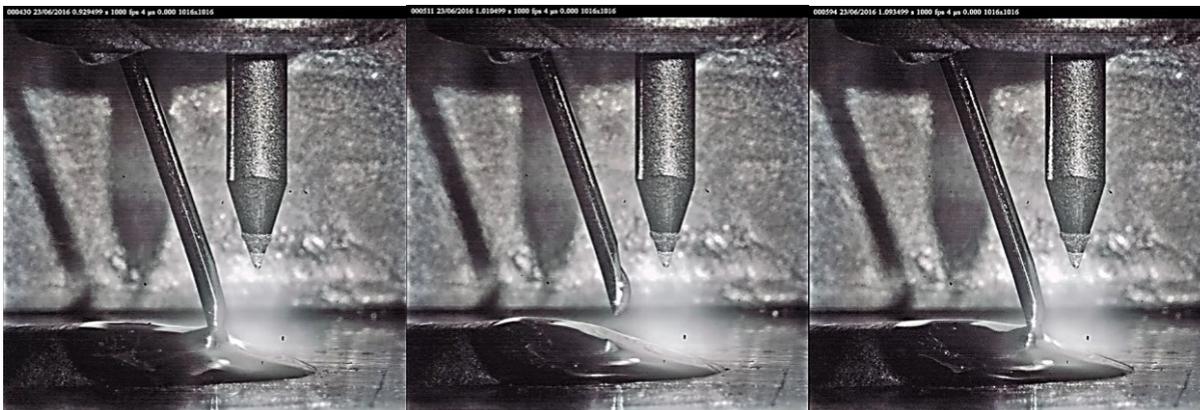
Figura 3.8 – Transferência metálica não interrompida (ponte) no processo TIG alimentado. Taxa de aquisição da filmagem: 1000 *fps*. Intervalo entre os *frames*: 23 ms



Fonte: O autor

Em virtude da V_a e da corrente serem parâmetros regulados de forma independente entre si, necessariamente, quando se tem uma potência muito elevada para uma determinada V_a , uma interrupção na formação da ponte metálica líquida pode acontecer. O arame passa a ser fundido antes de tocar na poça, sendo depositado periodicamente na poça de fusão, denominada como transferência por toque interrompida ou intermitente. A Figura 3.9 ilustra a transferência metálica interrompida.

Figura 3.9 - Transferência metálica interrompida (ou intermitente) no processo TIG alimentado. Taxa de aquisição da filmagem: 1000 *fps*. Intervalo entre os *frames*: 83 ms



Fonte: O autor

Em casos mais extremos, quando a relação entre a potência do arco e a V_a é muito defasada, geralmente em velocidades de alimentação muito baixas, menores que 1 m/min, a porção de material fundido começa a formar gotas de grande diâmetro, instáveis na ponta do arame, conforme ilustradas na Figura 3.10.. Esta condição não é desejável durante a soldagem devido ao alto risco de contaminação do eletrodo de tungstênio. Na soldagem do passe de raiz, por exemplo, muitas vezes é necessário utilizar uma condição com baixa V_a . Ainda assim, a situação apresentada na Figura 3.10 deve ser evitada e não pode ser considerada como um modo de transferência metálica aplicável no processo TIG.

Figura 3.10 – Transferência metálica instável com baixa velocidade de alimentação de arame



Fonte: (RIFFEL, 2018)

É importante esclarecer que a os efeitos provocados pela formação desproporcional da gota, em velocidades de alimentação mais baixas, são atenuados quando se opera o processo TIG com estratégias especiais de alimentação de arame, como a alimentação dinâmica, por exemplo. Este tema será abordado nos itens posteriores.

As demais características relevantes sobre o processo de soldagem TIG, que devem ser discutidas, estão relacionados à produtividade do processo. Embora o processo TIG convencional proporcione soldas que apresentam excelente qualidade, é bem possível encontrar informações técnicas ou até mesmo artigos científicos, cujas principais conclusões remetem à baixa produtividade do TIG quando comparados com outros processos a arco, como o MIG/MAG e o Arco Submerso, em níveis de taxa de fusão de arame e velocidade de soldagem (ESAB) (GONZÁLEZ, 2012)

(WEGLOWSKI, CHMIELEWSKI e KUDIÁ, 2016). Por outro lado, a superioridade do aspecto da solda e a menor susceptibilidade de defeitos atingidos com o processo TIG, coloca-o em patamares de comparação a processos de alta densidade de energia, por exemplo o processo Plasma (PAW - *Plasma Arc Welding*) e, até mesmo, ao processo Laser (LBW - *Laser Beam Welding*), o qual não utiliza um arco elétrico como fonte de energia. Apesar das referências relacionadas à baixa produtividade no processo TIG, os resultados obtidos nos trabalhos Schwedersky (2011) e Olivares (2015) sugerem que o processo apresenta pleno potencial para o aumento da produtividade. Nestes trabalhos os autores apresentam dados que permitem entender que o processo TIG, aplicado de maneira específica de operação, pode atingir resultados considerados de elevada produtividade, na qual se traduz nesses casos, pelo alcance de velocidades de soldagem da ordem de 1,5 m/min e união de chapas de 6,35 mm, sem a presença de chanfros (OLIVARES, 2015) (SCHWEDERSKY, 2011).

3.3. VERSÕES E MODOS DE OPERAÇÃO DO PROCESSO TIG

No contexto da soldagem TIG, aplicada em demandas específicas como soldagem de união, reparos e operações de revestimentos, novos equipamentos de diferentes fabricantes foram projetados. Atualmente, podem ser encontradas muitas terminologias de alcinho comercial como *TIGSpeed*, *TIPTIG*, *Dabber-TIG*, *TIGer*, *SpeedClad*, *TopTIG*, *InFocus TIG*, *K-TIG*, *ForceTIG*, *ArcTIG* entre outras, as quais prometem oferecer vantagens distintas e são destinadas às mais diversas aplicações. Mesmo assim, é importante deixar claro que todas estas terminologias supracitadas, são derivadas, na sua essência, do processo TIG convencional e não deveriam ser confundidas com um novo processo de soldagem. Isto quer dizer que algumas destas propostas de novos conceitos do processo, podem ser alcançadas, dependendo do equipamento disponível, simplesmente com uma adequada regulagem realizada nos parâmetros de soldagem ou adequação da configuração física do TIG convencional.

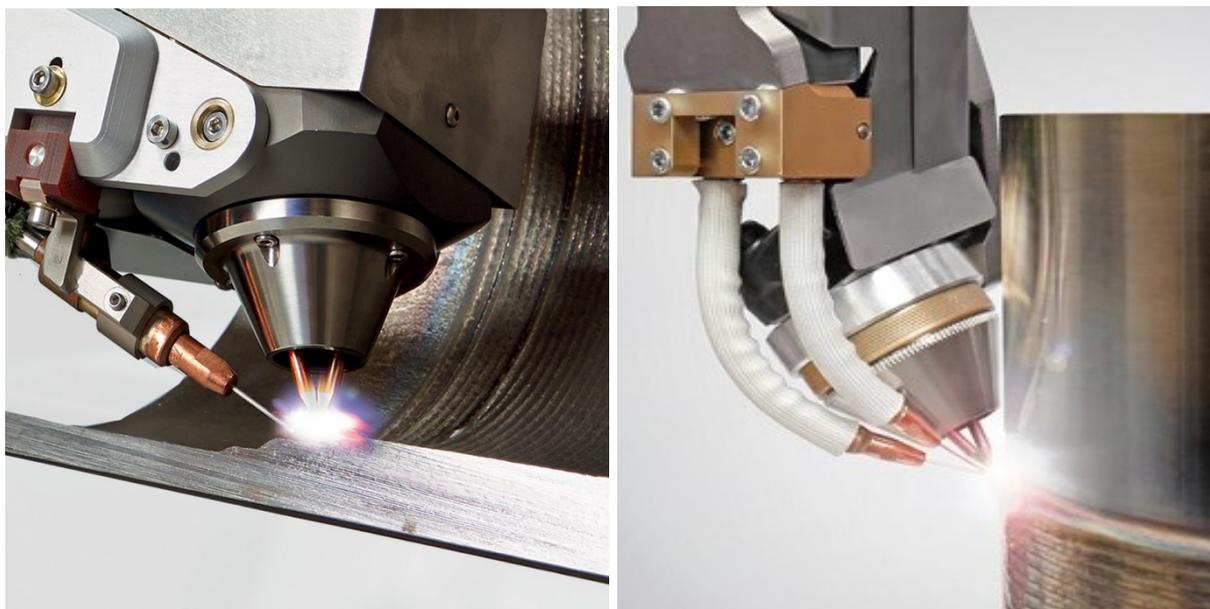
Estas modificações estão ligadas de forma direta às características do equipamento. Os aspectos construtivos dos componentes, o tipo de controle das fontes de soldagem e aspectos eletromecânicos dos demais elementos que compõem o sistema de soldagem, caracterizam tais inovações de processo e, naturalmente, devem ser classificados de acordo com a tecnologia empregada.

3.3.1 Variações Construtivas e Modos Operacionais

Algumas necessidades específicas contribuíram para ampliação das aplicações do processo TIG na indústria, motivando o desenvolvimento de diversos modelos comerciais de equipamentos nos últimos anos. Com as diferentes variantes do processo TIG é possível alterar significativamente o resultado de uma solda através da manipulação das variáveis de soldagem, tendo o arco um papel importante para o alcance de bons resultados no procedimento. Nesse contexto, a pressão exercida pelo arco elétrico na poça de fusão é uma variável inerente da aplicação de corrente e, portanto, considerada um fator fundamental que pode ser abordada sob diferentes óticas de processo.

Para minimizar as ações da pressão do arco e com o intuito de controlar a poça de fusão e aumentar a taxa de alimentação de arame, Kobayashi et al. (2004) desenvolveram uma variação do processo de soldagem TIG, o qual foi denominado inicialmente pelos autores como SEDAR-TIG, do inglês “*Super Energetic Dual Arc TIG*”. Em demais trabalhos, o processo também é denominado como TIG-DE (*double-electrode*) (SCHWEDERSKY, 2015). Este equipamento emprega dois eletrodos afastados a uma distância determinada, com potencial isolado, em uma única tocha visando obter maiores taxas de deposição sem sacrificar as vantagens do método convencional de soldagem TIG. A Figura 3.11 ilustra dois modelos comerciais de equipamentos TIG-DE já comercializadas por diferentes fabricantes.

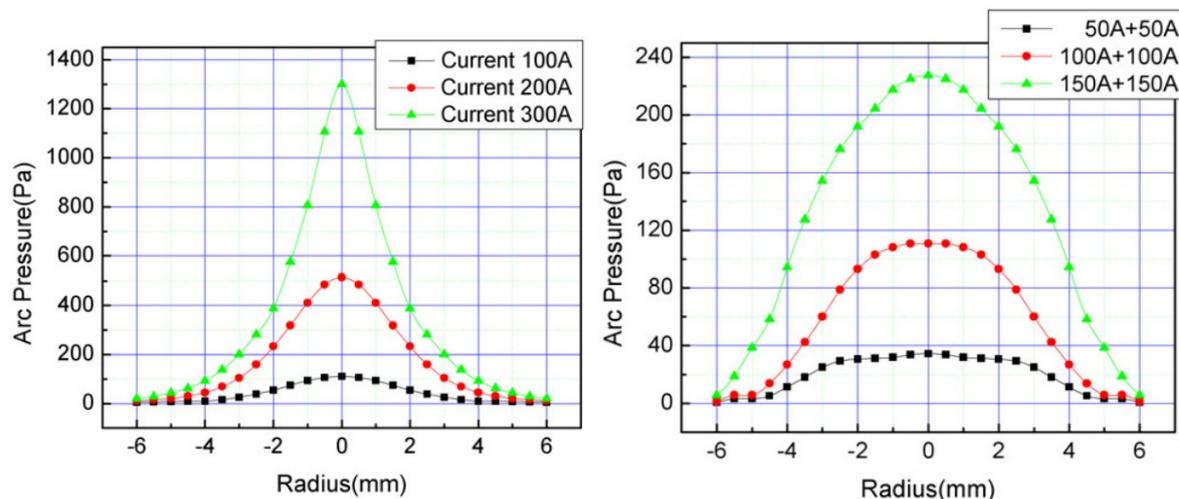
Figura 3.11 – Modelos comerciais de equipamentos TIG duplo-cátodo a) um arame de adição b) dois arames de adição



Fonte: <https://www.polysoude.com>, <https://www.fronius.com>

O fator importante que deve ser considerado na utilização desta variação do processo TIG baseia-se na obtenção de baixa pressão exercida pelo arco na poça (ou pressão de estagnação do arco), comparado ao modelo que utiliza apenas um eletrodo. Leng, Zhang e Wu (2006) apresentaram resultados de medição de pressão de estagnação ilustrados na Figura 3.12, comparando o processo TIG-DE com o TIG convencional.

Figura 3.12 – Medição da distribuição da pressão de estagnação do arco com diferentes níveis de corrente (DEP: 3 mm, TIG-DE com 4 mm de afastamento entre os eletrodos)



Fonte: (LENG, ZHANG e WU, 2006)

A partir da análise dos gráficos da Figura 3.12, é possível compreender que a pressão de estagnação no TIG-DE é significativamente menor que no TIG convencional. Tomando como exemplo a curva de 300 A e 150+150 A (em verde nos gráficos), fica evidente que o valor da pressão exercida pelo arco TIG convencional é, aproximadamente, cinco vezes maior que o valor da pressão exercida pelo arco TIG-DE. Como pôde ser visto, este fato sugere a utilização do TIG-DE em operações de revestimento, observado na Figura 3.11, visto que uma menor pressão do arco proporciona uma menor diluição da solda na peça.

De outra forma, sob ponto de vista produtivo, realizar a soldagem sem a necessidade de preparação de chanfros nas juntas, garantindo mesmo assim a penetração total, pode ser considerado um aspecto econômico muito importante. Neste contexto, alguns equipamentos foram projetados e fabricados para esta finalidade, como as tochas consideradas de elevada produtividade, ilustradas na Figura 3.13, que podem operar com correntes de até 1000 A.

Figura 3.13 - Modelo comercial de tocha de soldagem TIG desenvolvidas para atuar com alto nível de corrente.

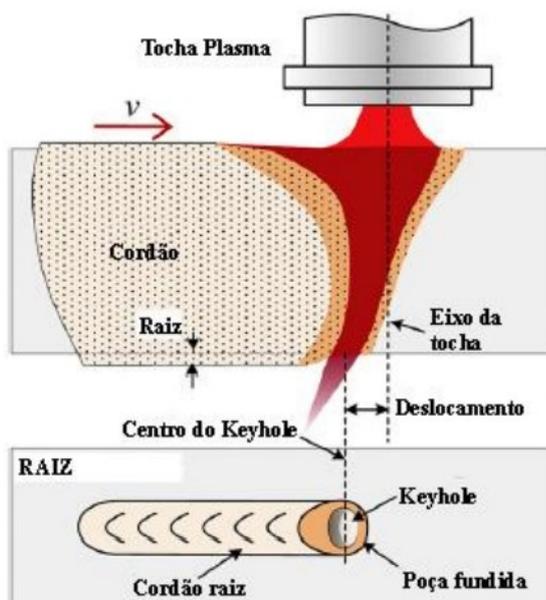


Fonte: <http://www.kjellberg.de>

Neste caso, a estratégia que torna possível o emprego de correntes tão elevadas nos diferentes modelos apresentados baseia-se, principalmente, no aumento efetivo da transferência de calor por convecção entre o fluido refrigerante, as paredes internas de cobre da tocha e o eletrodo de tungstênio. Com o aumento da taxa de resfriamento, preserva-se a vida útil do eletrodo de forma expressiva em relação a uma tocha TIG convencional, operando com os mesmos parâmetros

(OLIVARES, 2015). O que na maioria das vezes se almeja com a utilização desta variação do processo TIG, é a obtenção do *keyhole*. O modo *keyhole*, do inglês “buraco de fechadura” é utilizado para designar uma técnica não convencional de soldagem na qual o jato plasma atravessa a junta a ser soldada (Figura 3.14). Para se obter o *keyhole* no processo TIG, é necessário ajustar os parâmetros, principalmente a corrente, de modo que atinja um patamar suficiente para que o arco produza pressão elevada sobre a poça de fusão e proporcione uma penetração que seja suficiente para fundir toda a espessura da chapa. Desta forma, forma-se um pequeno orifício circular que vai se movimentando à medida que o arco avança pelo percurso de soldagem (REIS e SCOTTI, 2007).

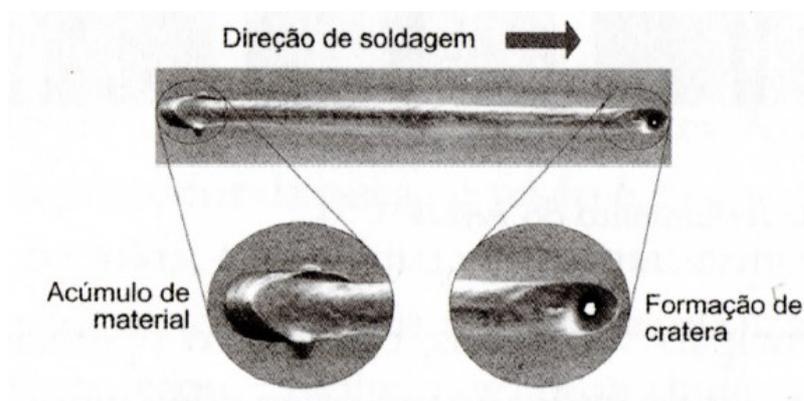
Figura 3.14 - Representação didática do modo operacional *keyhole* no processo plasma (PAW)



Fonte: (OLIVARES, 2015)

O modo operacional *keyhole* apresenta como principais vantagens, a garantia de penetração total na junta em operações mecanizadas e a capacidade de soldar juntas em passe único. Porém, Reis e Scotti (2007), discutem que é comum a formação de defeitos no início e no final do cordão quando o modo *keyhole* é operado sem a imposição de rampas de descida da corrente, pois a interrupção brusca do arco, preserva o orifício no cordão, caracterizando a formação de cratera (Figura 3.15).

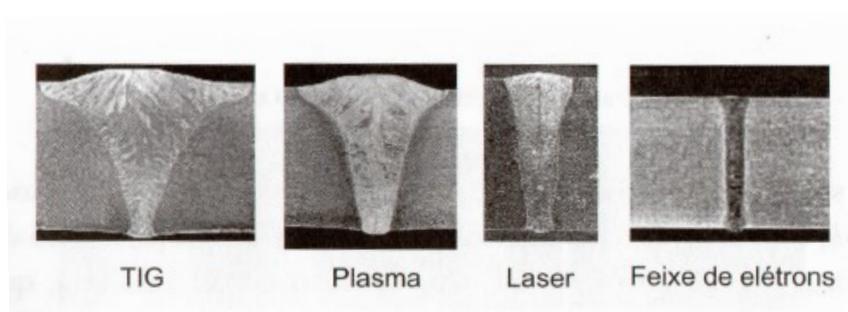
Figura 3.15 - Defeitos decorrentes do processo plasma operando no modo *keyhole* (formação de cratera)



Fonte: (REIS e SCOTTI, 2007)

É comum encontrar na literatura este modo operacional atrelado ao processo Plasma (PAW), devido às características geométricas que a tocha plasma confere à constrição do arco. Apesar disso, o modo *keyhole* pode ser obtido com outros processos de soldagem além do Plasma. Na Figura 3.16, são mostrados exemplos de penetração total com passe único, obtidos com diferentes processos de soldagem.

Figura 3.16 - Perfil geométrico de cordões obtidos por *keyhole* com variados processos de soldagem



Fonte: (REIS e SCOTTI, 2007)

3.3.2 Variações na Alimentação de Material de Adição

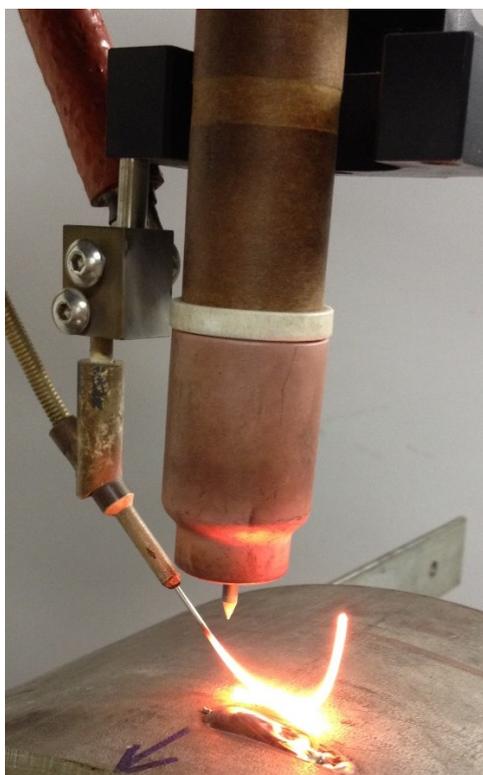
Considerando os aspectos relacionados a alimentação de arame, também são encontradas variantes no modo de operação do processo. No entanto, vale lembrar que o uso e propagação de termos por parte da literatura da soldagem pode apresentar muitas vezes desconexões devido à carência de normas técnicas. Neste contexto, uma das variações que será apresentada de forma mais aprofundada

posteriormente é a alimentação tangencial. O termo alimentação tangencial é usado em alguns trabalhos para exemplificar técnicas modernas do processo TIG (PAES, 2016) (RIFFEL, 2018) (GODINHO, 2017) (DÍAZ, CORTES e ALVAREZ, 2017) (ROSA, DIRENE, *et al.*, 2018). Em suma, o modelo comercial TopTIG é utilizado como exemplo desta prática. Um termo concorrente foi utilizado por Godinho (2017) e denomina-se como “alimentação radial”. No trabalho, o autor utilizou este termo para caracterizar os métodos convencionais de alimentação de arame no TIG, ou seja, equipamentos que utilizam os direcionadores separados do bocal com ângulos de inserção maiores que no TopTIG, conforme já ilustrado na Figura 1.1. Desse modo, a conclusão é que a alimentação radial e tangencial usualmente pode ser apresentada como duas técnicas distintas de inserção de arame no processo TIG. Cabe ressaltar que o presente trabalho não objetiva oferecer uma nomenclatura padrão para as versões aqui citadas.

Dentre as demais variações no modo de alimentação de arame, existe a possibilidade de utilizar aquecimento no arame empregado como material de adição, técnica denominada como TIG *Hot Wire* (arame quente). Quando não se utiliza aquecimento no arame, o processo é denominado na literatura como TIG *Cold Wire* (arame frio) e pode ser considerado um método muito comum de alimentação de arame, sendo nesse caso, o arame alimentado em temperatura ambiente. Esse modo de alimentação de arame faz parte, normalmente, de equipamentos de soldagem TIG mais simples, pois estes não apresentam os componentes eletrônicos adicionais em sua construção, necessários para realizar o controle do aquecimento do arame. Em termos de eficiência,) parte do calor disponibilizado pelo arco é destinado apenas para aquecer o arame a uma temperatura elevada e depois sim, fundi-lo (HENON, 2018). No modo *hot wire* isso não acontece, pois, o arame já está aquecido a uma elevada temperatura, não necessitando de parte desta energia inicial do arco para aquece-lo antes de fundi-lo. O modo *hot wire* acontece por meio da aplicação de uma corrente elétrica no arame de adição gerando o aquecimento de sua extensão sólida por efeito Joule. No entanto, apesar de ser tecnicamente possível aquecer o arame, quando se observa os parâmetros utilizados na indústria, percebe-se que o aquecimento do arame é relativamente menor que o seu ponto de fusão nos principais materiais utilizados. Por exemplo, Silva (2016), aplicando uma corrente de 75 A no arame, estimou uma temperatura de 361°C para o arame de aço carbono. Esta técnica foi

patenteada em 1968 (HORI, KAGAWA, *et al.*, 1986) e pode ser observada na ilustração da Figura 3.17.

Figura 3.17 – Representação do aquecimento do arame por efeito Joule (modo *Hot wire*) em equipamento convencional, sem a presença do arco. Corrente no arame: 70 A



Fonte: O autor

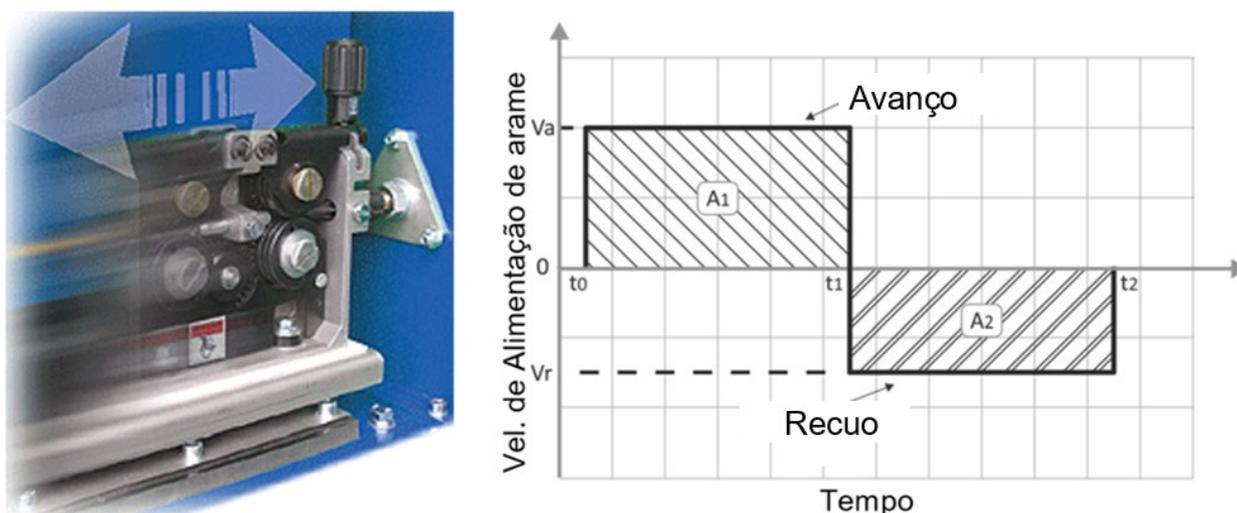
Esse fato colabora para que muitas vezes seja possível adicionar mais arame no processo TIG com o emprego do modo *hot wire*. Além disso, o modo *hot wire* pode ser utilizado, como uma estratégia de redução do aporte térmico na peça, pois, desta forma, se reduz os valores de corrente do arco, uma vez que o arame já é alimentado na poça de fusão com maior quantidade de calor. Como consequência disso, a penetração pode ser reduzida, favorecendo as operações de revestimento, por exemplo.

Além das características térmicas de alimentação de arame (*Cold Wire* e *Hot Wire*) serem utilizadas para controle da taxa de alimentação, as características dinâmicas de alimentação de material — variação de velocidade — podem ser utilizadas para adequar a transferência de material no processo TIG. Neste trabalho, define-se alimentação dinâmica, como um movimento variável na alimentação do arame, com o propósito de modificar as características da transferência metálica no

processo. Através desta técnica, quando regulada em baixas frequências (até 2 Hz), é possível obter um movimento semelhante à inserção da vareta, movimento realizado por um soldador (PAES, 2016). Todavia, em virtude de o deslocamento da tocha ser mecanizado com alimentação automática de arame, pode-se considerar que o processo tende a ocorrer de maneira contínua e com maior grau de repetibilidade, diferentemente de uma situação manual.

Alguns equipamentos de soldagem permitem regular diferentes velocidades de arame (pulso e base) no processo TIG pulsado, para que se adeque a relação velocidade de alimentação/potência disponível. Contudo, equipamentos de soldagem como TIPTIG, por exemplo, utilizam uma estratégia de oscilação de todo o sistema de tração do arame, o que por consequência, resulta em uma movimentação do tipo avanço e recuo do arame de adição na poça, assim como o TIGSpeed. A estratégia do TIPTIG pode ser melhor compreendida com auxílio da Figura 3.18.

Figura 3.18 - Ilustração da movimentação do sistema de tracionamento de arame do equipamento TIPTIG e representação esquemática do comportamento da V_a . (A1) Velocidade de avanço; (A2) velocidade de recuo do arame.



Fonte: (WILSON, 2007) e (SILVA, PAES, *et al.*, 2018)

Uma das primeiras publicações encontradas na literatura sobre esta técnica foi feita por um membro da *General Electric Co.*, em 1982. Conforme este autor, a combinação de modificações tanto mecânicas quanto eletrônicas garantiram o movimento de avanço e recuo do arame em direção à poça, durante a construção de paredes finas na reparação de motores de aeronaves (RUDY, 1982). Neste artigo, o

autor cita que a ação de inserção de arame no arco de maneira intermitente permite o resfriamento momentâneo da poça. Pois, desta forma, parte desse calor acaba sendo transferido para o arame durante o contato com a poça, o que contribui com a sua fusão e resfriamento da poça. Além disso, no trabalho é constatado que a oscilação do arame garante que não sejam formadas gotas de grande diâmetro (maiores que o diâmetro do arame) na ponta do arame, conseqüentemente, fazendo com que a poça não atinja uma grande dimensão e escorra, devido ao excesso de material de adição. Desta forma, o equilíbrio térmico da poça era mantido, sem que houvesse escorrimento de material fundido. Rudy (1982) conclui que a característica da alimentação dinâmica foi fundamental para obter êxito na fabricação de paredes finas nos motores.

Aspectos relacionados ao comportamento térmico da poça foram comparados com auxílio da técnica de termografia, em diferentes condições, sendo elas autógena, alimentação contínua e dinâmica de arame. Neste estudo, a alimentação dinâmica alterou o perfil térmico observado no verso da chapa, mostrando valores mais baixos em relação às demais condições testadas. Além disso, foi verificado que a transferência de metal ocorreu totalmente dentro da poça de fusão, sem formação prévia de gotas fundidas na ponta do arame, demonstrando uma vantagem para a soldagem fora de posição devido à redução do risco de contaminação do eletrodo (SILVA, PAES, *et al.*, 2018).

3.4. SISTEMA TOPTIG

O sistema TopTIG, o qual pode ser qualificado como uma versão do processo TIG, é um equipamento concebido para operar de forma automatizada. Este sistema é composto por uma fonte, uma tocha de soldagem, uma unidade de refrigeração específica para o bocal e outra para a tocha e um cabeçote alimentador de arame. O sistema TopTIG opera somente no modo *cold wire*. Originalmente esta versão do processo TIG foi desenvolvida para aplicações na indústria automotiva, em soldagem de componentes muito finos (Figura 3.19), e em soldagem e brasagem de componentes de aço galvanizado, os quais apresentam difícil soldabilidade empregando o processo MIG (FORTAIN, GUIHEUX e OPDERBECKE, 2013).

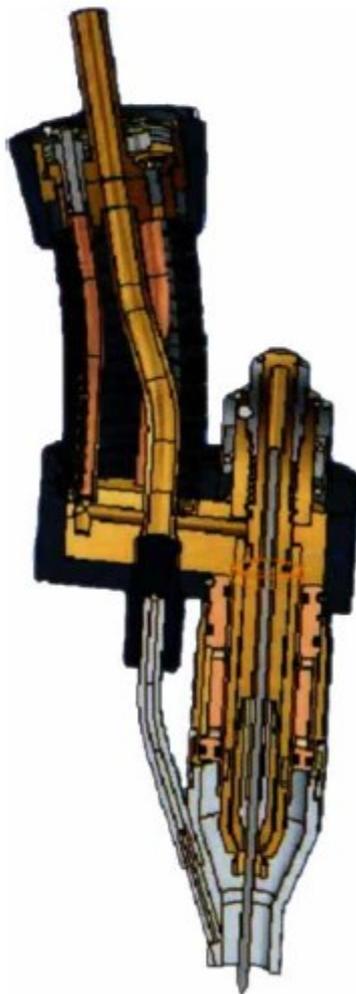
Figura 3.19 – Exemplos de aplicações do equipamento TopTIG, (a) soldagem de chapas de Inconel 718 com espessura de 1,5mm; (b) soldagem de estruturas da indústria automobilística



Fonte: (TURYK, GROBOSZ, *et al.*, 2015) e (FORTAIN, RIMANO e VAIDYA, 2008)

Fortain, Guiheux e Opderbecke (2013) afirmam que, dentre outras vantagens, o principal diferencial do TopTIG está associado ao projeto da tocha, em particular o bocal, o qual possui um direcionador de arame integrado. Nesse caso, o arame é direcionado em uma posição fixa através do bocal por uma guia. Ao contrário dos sistemas TIG alimentados convencionais, no sistema TopTIG o arame é inserido em uma distância muito pequena em relação ao eletrodo, respeitando a recomendação do fabricante de manter uma distância máxima de uma vez e meia o diâmetro do arame utilizado. Além disso o eletrodo deve ser afiado com um ângulo de 20° de modo a manter o paralelismo com o ângulo de inserção do arame, relativo ao eixo do eletrodo de tungstênio (FORTAIN, RIMANO e VAIDYA, 2008) (FORTAIN, GUIHEUX e OPDERBECKE, 2013). Sob o ponto de vista operacional e considerando o correto alinhamento entre arame/eletrodo um desafio a ser enfrentado no TIG convencional, pois existem conjuntos separados que podem facilmente apresentar desalinhamentos entre si, o TopTIG apresenta vantagem sob este aspecto, uma vez que o direcionador de arame e o bocal compõem um corpo só, fixo e robusto, verificado na Figura 3.20.

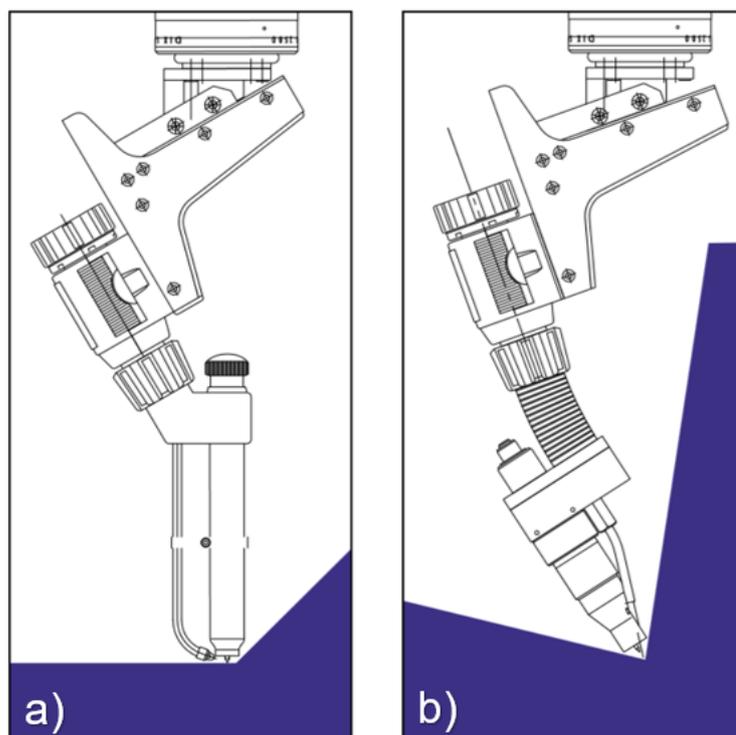
Figura 3.20 –Representação em corte da tocha e bocal TopTIG.



Fonte : (FORTAIN, GUIHEUX e OPDERBECKE, 2013)

Além disso, em comparação com equipamentos TIG alimentados convencionais, a configuração compacta com dimensões gerais reduzidas da tocha, confere um maior grau de acessibilidade ao equipamento, especialmente em soldagens automatizadas em locais mais restritos e de geometrias complexas ilustrado na Figura 3.21.

Figura 3.21 - Comparação de acessibilidade entre (a) equipamentos TIG convencionais e (b) TopTIG

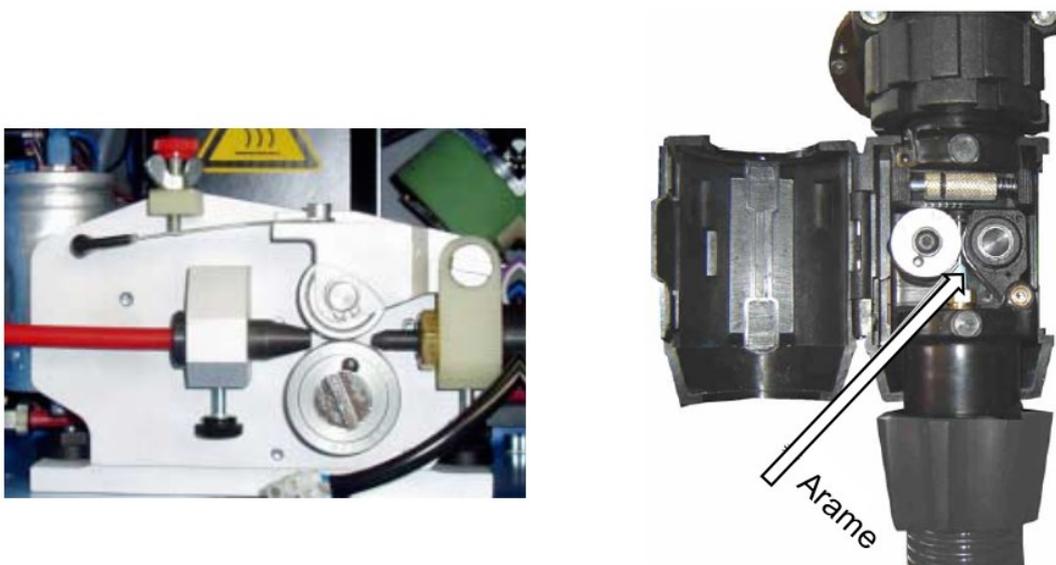


Fonte: (FORTAIN, RIMANO e VAIDYA, 2008)

No TopTIG, a adição de arame acontece por meio de um sistema de alimentação, onde dois motores tracionadores são sincronizados com a fonte, de modo que o arame seja impulsionado pelos roletes no cabeçote alimentador e puxados pelos roletes próximos ao corpo da tocha. Este sistema, ilustrado na Figura 3.22, é denominado pelo fabricante como *push-push* (AIR LIQUIDE WELDING, 2018). Da mesma forma, esta tecnologia tem sido utilizada com bastante frequência em equipamentos de soldagem MIG/MAG de diferentes fabricantes, especialmente nos equipamentos que possuem um longo comprimento de conduítes e podem também serem encontrados pela denominação *push-pull* (SCOTTI e PONOMAREV, 2014). Apesar de parecer não haver um consenso claro para utilização dos termos *push-pull* e *push-push* entre fabricantes de equipamentos, sabe-se que estes sistemas atuam com dois motores sincronizados, considerados como um principal (mestre) e um auxiliar (escravo). No TopTIG a informação que o fabricante disponibiliza é que o motor do cabeçote alimentador efetua o controle do torque no arame, atuando como uma espécie de freio, e o outro motor, próximo à tocha, controla a velocidade de alimentação. Desse modo, o arame tende a permanecer levemente tensionado dentro do conduíte. Assim, são minimizados ou eliminados os efeitos do fenômeno *stick-slip*.

Este fenômeno representa um movimento espontâneo que pode ocorrer enquanto dois elementos estão deslizando um sobre o outro. Na soldagem com arame de adição, este fenômeno se traduz, sobretudo, quando o arame permanece sob uma condição de efeito massa-mola dentro do conduíte, devido ao atrito gerado entre o próprio arame e a parede do conduíte. Como consequência do travamento e, em seguida, um avanço muito rápido do arame, são geradas perturbações na alimentação, tendendo a ocasionar instabilidades no arco e na transferência metálica, tanto para o TIG quanto para o MIG/MAG.

Figura 3.22 – Sistema *push-push*. a) controle de torque no cabeçote alimentador b) controle de velocidade de alimentação na tocha de soldagem TopTIG

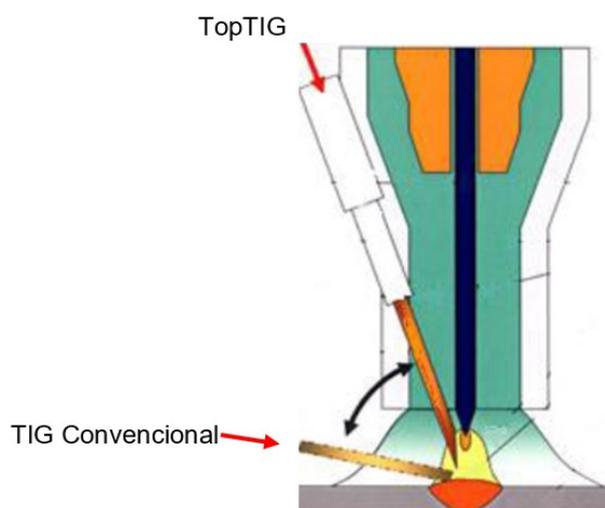


Fonte: (AIR LIQUIDE WELDING, 2018)

A partir das estratégias e modos de operação do processo TIG, apresentadas em itens anteriores deste trabalho, é importante destacar que na alimentação de arame do sistema TopTIG não se consegue recuar o arame para trás, como é o caso do sistema TIPTIG. Ainda assim, é possível regular duas velocidades de alimentação distintas, de acordo com a necessidade de se estabelecer uma condição estável da transferência metálica e uma relação entre potência e V_a adequada. Esta característica é comum nos demais equipamentos de soldagem TIG alimentado com corrente pulsada.

Devido à característica construtiva do bocal, principal diferencial deste equipamento, proporciona-se desta forma ao arame sua inserção em regiões de maior temperatura do arco TIG, se comparado à configuração de um sistema TIG alimentado convencional. Esta região situa-se próximo à ponta do eletrodo de tungstênio, sendo esta particularidade amplamente difundida pelo fabricante (Figura 3.23). Devido à proximidade com o eletrodo, o arame tende a fundir mais rápido, acarretando consequentemente no aumento da taxa de deposição e na velocidade de soldagem (FORTAIN, GUIHEUX e OPDERBECKE, 2013) (FORTAIN, RIMANO e VAIDYA, 2008) (OPDERBECKE e GUIHEUX, 2009).

Figura 3.23 - Comparação das regiões de inserção do arame do TIG convencional com o sistema TopTIG



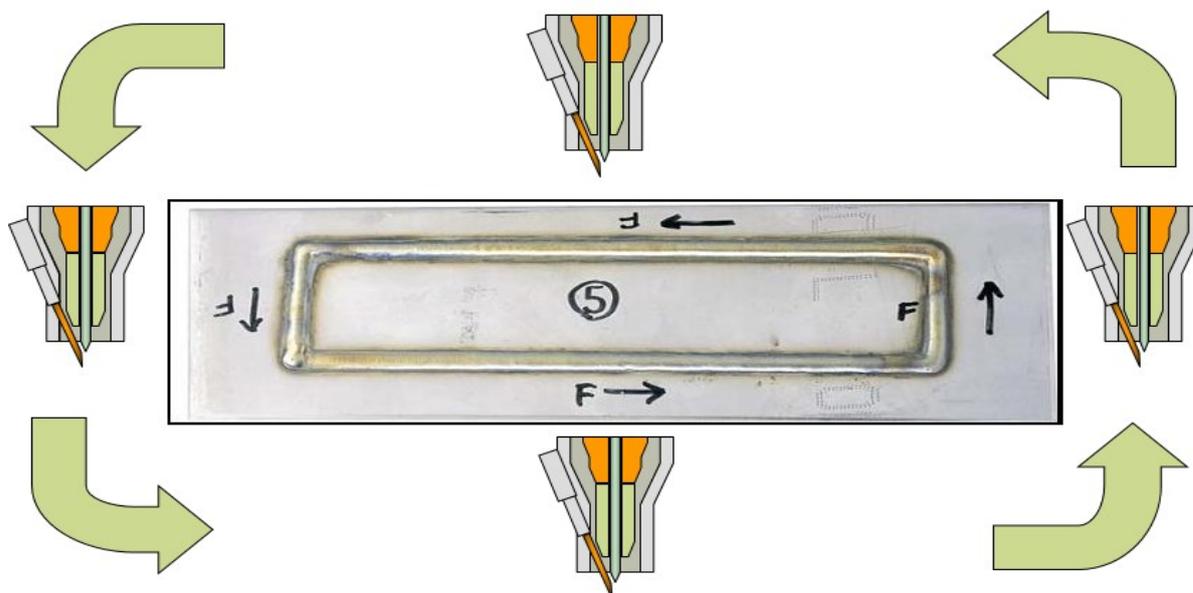
Fonte: Adaptado de (FORTAIN, RIMANO e VAIDYA, 2008)

Nos estudos, os autores citam que as vantagens da condição de inserção de arame só existem em virtude da configuração compacta entre a tocha e o direcionador de arame. Além de aumentar a taxa de deposição, torna-se possível aumentar a velocidade de soldagem, em comparação ao TIG convencional.

Outro aspecto vantajoso do bocal que o fabricante apresenta no material de divulgação do equipamento é a flexibilidade na direção em que o arame é alimentado na poça. O fabricante sugere que neste equipamento o arame pode ser alimentado na poça em todas as orientações em relação a direção de soldagem, ou seja, por trás, pela frente e pela lateral do arco. Segundo o fabricante, isto garante bons resultados sem que haja alteração significativa, principalmente nas

características geométricas das soldas. Um exemplo disso, divulgado pelo fabricante, pode ser analisado na Figura 3.24.

Figura 3.24 – Cordão de solda realizado em todas as direções de alimentação de arame no arco, com o sistema comercial de alimentação tangencial



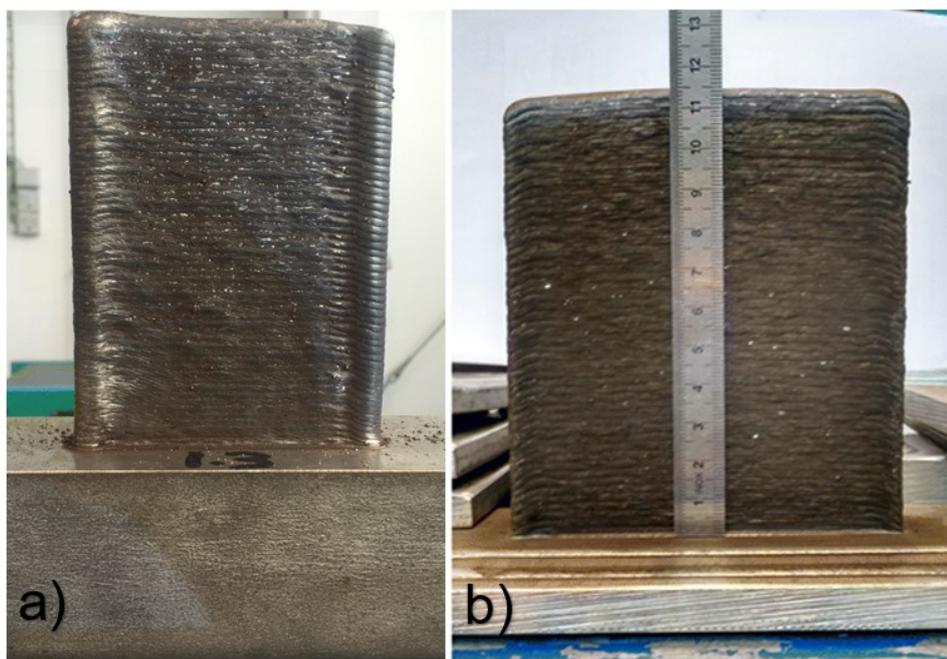
Fonte: (AIR LIQUIDE WELDING, 2008)

Este é um atributo importante quando se trata do processo TIG automatizado com alimentação de arame, pois, em uma configuração convencional do TIG é necessário que o robô execute uma movimentação muito complexa para garantir a alimentação do arame sempre na mesma orientação, por trás do arco por exemplo, limitando o número de aplicações do equipamento em trajetórias mais complexas. De fato, na soldagem TIG mecanizada ou com robôs é necessário disponibilizar um eixo rotativo para orientar o direcionador do arame e mantê-lo combinado com a direção de soldagem, pois o arame não é inserido de forma coaxial com o eletrodo de tungstênio, como acontece no MIG/MAG (RODRIGUEZ, 2018). Portanto, nesse contexto, essas características proporcionam ao TopTIG operar com a flexibilidade de movimentação e posicionamento da tocha comparável ao processo MIG/MAG, porém, com a qualidade do processo TIG (FORTAIN, GUIHEUX e OPDERBECKE, 2013).

Além desta característica ser altamente favorável em aplicações como soldagem de união, esta flexibilidade da alimentação pode representar uma potencial vantagem em aplicações do tipo manufatura aditiva por arco elétrico (*Wire Arc Additive*

Manufacturing – WAAM). Rodriguez (2018) comparou o TopTIG com um processo variante do MIG/MAG, denominado CMT (*Cold Metal Transfer*), para fabricar paredes espessas de aço inoxidável 316L. As paredes construídas com os dois processos podem ser comparadas nas imagens da Figura 3.25.

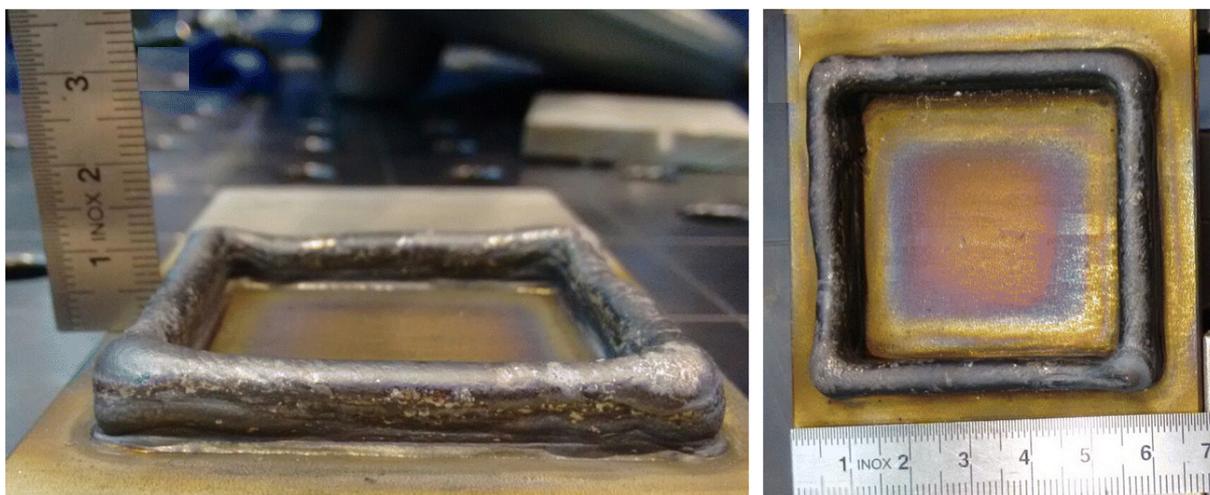
Figura 3.25 – Paredes fabricadas por manufatura aditiva por arco elétrico (WAAM) a) Processo MIG/MAG *Cold Metal Transfer* b) Processo TIG com alimentação tangencial



Fonte: (RODRIGUEZ, 2018)

Para conferir as propriedades coaxiais de alimentação de arame, sobre as quais o TopTIG se aproxima, Rodriguez (2018) realizou em seu trabalho trajetórias de formato quadrado com a sobreposição de cordões de solda de camada única (Figura 3.26). Embora no artigo seja apresentado somente o resultado do teste sem qualquer discussão sobre as características apresentadas pelo processo, é possível perceber que os cordões não são completamente regulares, além de apresentar escorrimentos de um cordão sobre o outro. Não fica claro neste trabalho se isto ocorreu devido a uma seleção inapropriada de parâmetros de soldagem, como o emprego de corrente elevada sem a regulagem de rampas de subida e descida. O que se sabe é que não foi utilizado o sistema de controle de comprimento do arco (AVC) para realizar as sobreposições dos cordões. Desta forma, com comprimento elevado, o arco pode ter desestabilizado a poça de fusão que, para esta aplicação, deve ser a menor possível.

Figura 3.26 – Teste realizado em trajetória quadrada para conferir a flexibilidade de alimentação de arame por todos os lados do arco com alimentação tangencial

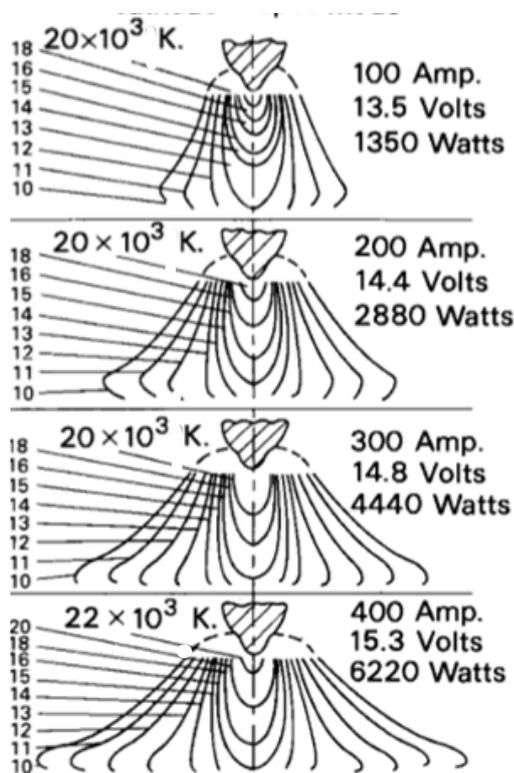


Fonte: (RODRIGUEZ, 2018)

Atualmente, existe uma ampla gama de processos de soldagem, os quais utilizam diferentes fontes de energia para obter a solda. Muitos deles, dependem exclusivamente do arco elétrico para transferir energia para a peça, como é o caso do TIG. Assim, a eficiência dessa transferência de energia depende, em termos gerais, da distribuição da temperatura do arco (GICK, QUIGLEY e RICHARDS, 1973). Conforme ilustrado anteriormente na Figura 3.23, no TopTIG, o fabricante informa que o arame é inserido em uma região que atinge temperaturas da ordem de 1000 K à 16000 K, próximas à ponta do eletrodo de tungstênio, enquanto que a temperatura da região da coluna do arco (região em amarelo) apresenta temperaturas em torno de 4000 K à 10000 K (FORTAIN, RIMANO e VAIDYA, 2008) (OPDERBECKE e GUIHEUX, 2009) (FORTAIN, GUIHEUX e OPDERBECKE, 2013) (TURYK, GROBOSZ, *et al.*, 2015). Entretanto, algumas ponderações devem ser realizadas em relação aos estudos supracitados. Nestes casos os autores não evidenciam como realizaram as medições das temperaturas apresentadas, tampouco apresentam referências de onde elas foram obtidas. Outros fatores relevantes que podem ser questionados, estão relacionados ao nível de corrente usado. Sabe-se que para diferentes níveis de corrente a distribuição de temperatura do arco pode mudar de forma desproporcional, sobretudo devido aos efeitos de ionização dos gases se tratando, neste caso, de um fenômeno não linear.

Há algum tempo, a maioria das pesquisas relacionadas à medição de temperatura da coluna do arco são realizadas pela técnica de espectroscopia, enquanto um arco estático arde sobre uma base refrigerada de cobre. Uma das primeiras medições da temperatura do arco TIG encontrada, foi realizada na década de 60 por Olsen (OLSEN apud. LANCASTER, 1986). Neste trabalho o autor apresenta um mapa das isotermas do arco com temperaturas da ordem de 20000 K, próxima a ponta do eletrodo, ilustrado na Figura 3.27, superior às temperaturas apresentadas anteriormente.

Figura 3.27 - Mapeamento das isotermas do arco, protegido com argônio puro.

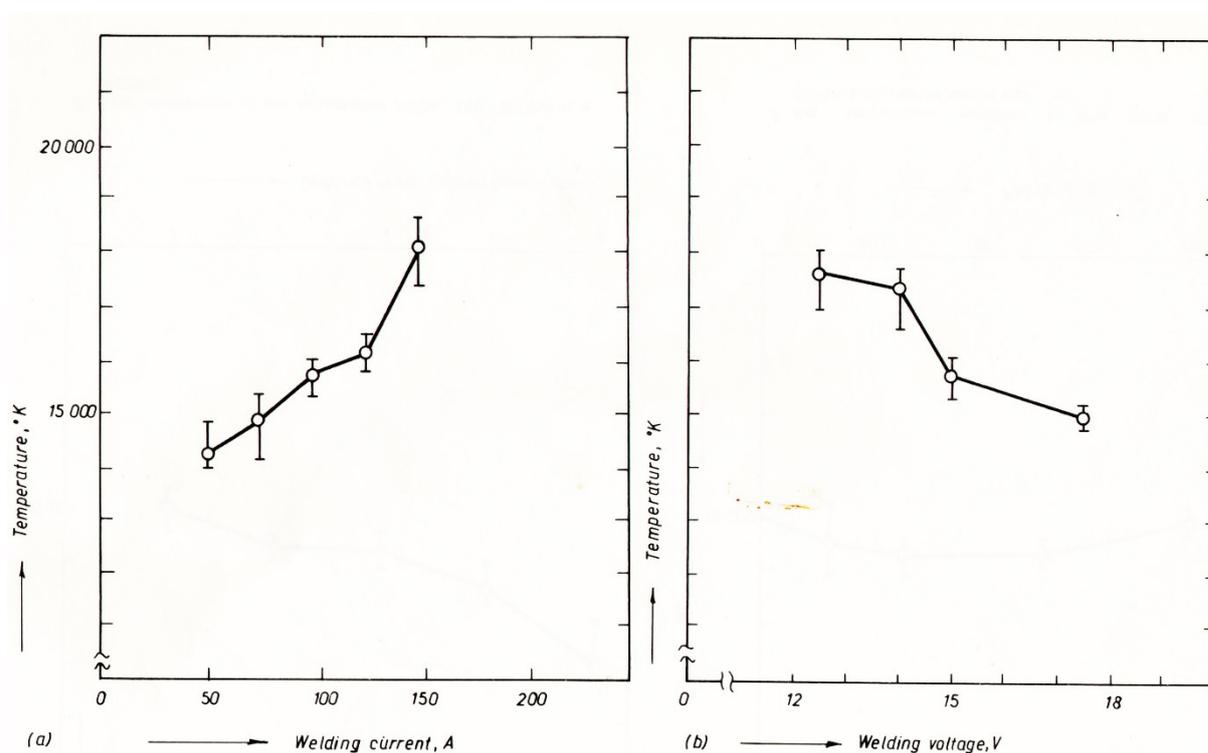


Fonte: Adaptado de (LANCASTER, 1986)

No TIG, é natural que a tensão aumente conforme o aumento controlado da corrente, para a mesma distância eletrodo-peça, devido à característica estática do arco TIG. Além disso, na Figura 3.27, é possível perceber que a temperatura da coluna do arco parece não variar significativamente para correntes de arco de até 400 A. Este fato é discutido por Lancaster (1986), onde o autor cita que, apesar do valor da variação da corrente ser alta, isso acontece pelo fato da condutividade térmica do gás perto do cátodo não variar de forma expressiva, mantendo-se quase constante para valores de corrente de até 400 A.

Key, Chan e Mcilwain (1983) obtiveram uma temperatura de 1000 K, a uma distância de 1 mm acima do ânodo, no eixo de um arco de 2 mm de comprimento, utilizando uma corrente de 300 A. No entanto, Haddad e Farmer (1984), mediram uma temperatura acima de 22000 K para a mesma posição em um arco de 200 A do mesmo comprimento. Kobayashi e Suga (1979), mediram temperaturas de cerca de 18000 K próximas ao cátodo. Neste estudo os pesquisadores utilizaram a técnica da espectroscopia para medir a temperatura da coluna do arco e um bloco de cobre refrigerado a água foi utilizado como ânodo. Da forma como o estudo foi conduzido, foi observado que a temperatura da coluna do arco é diretamente proporcional à corrente de soldagem e inversamente proporcional à tensão. Os gráficos apresentados por estes autores para corroborar esta afirmação podem ser observados na Figura 3.28.

Figura 3.28 – Relação da temperatura com as variáveis elétricas de soldagem (Corrente: 100A , Tensão: 15 V, Gás: Argônio)

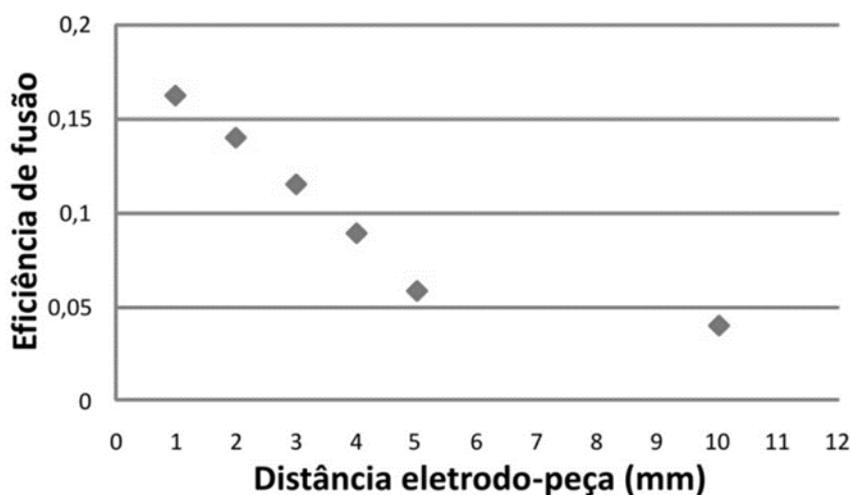


Fonte: (KOBAYASHI e SUGA, 1979)

De certa forma, é esperado e intuitivo que com o aumento da corrente de soldagem a temperatura máxima do arco também aumente, porém, no estudo, isso não acontece com o aumento da tensão. Apesar de não ser informado neste artigo, a

hipótese que pode ser levantada neste caso é que, como não é possível controlar a tensão do TIG na fonte de soldagem, os autores mantiveram a corrente e aumentaram a DEP para que desta maneira a tensão aumentasse. Assim, se explicaria a queda da temperatura máxima medida, pois, ao aumentar a DEP, as perdas de calor do arco por convecção também aumentam acarretando possivelmente na diminuição da temperatura no ponto de medição. No trabalho realizado por Schwedersky (2011) os resultados dos ensaios mostraram que com o aumento da DEP ocorreu o aumento da tensão do arco e da potência, no entanto, para distâncias maiores que 2 mm, a eficiência de fusão caiu drasticamente, conforme o gráfico apresentado pelo autor na Figura 3.29.

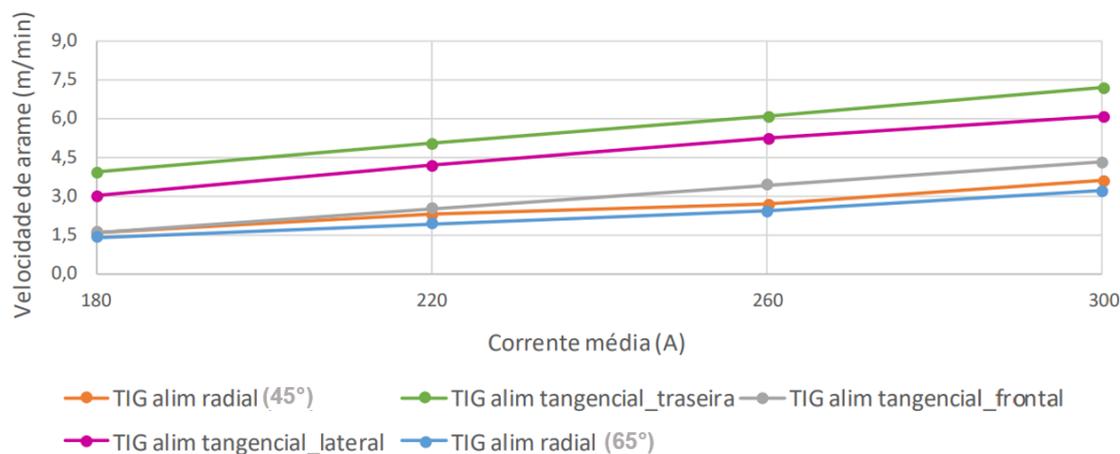
Figura 3.29 - Eficiência de fusão em função da distância eletrodo-peça



Fonte: (SCHWEDERSKY, 2011)

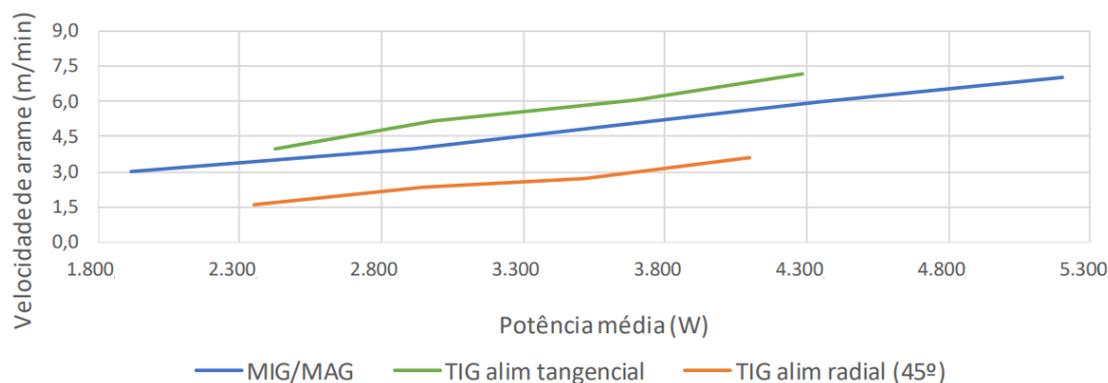
Questões relacionadas à produtividade do sistema TopTIG foram estudadas por Godinho (2017) e comparadas aos processos TIG alimentado convencional e o MIG/MAG. No referido trabalho, o autor apresenta evidências que remetem ao TopTIG maiores taxas de deposição de arame, comparado às demais condições de soldagem estudadas, conforme representado nos gráficos da Figura 3.30 e Figura 3.31. A característica multidirecional da posição de inserção do arame também foi estudada e discutida na dissertação de mestrado de Godinho (2017). Os resultados mostraram que houve variações na geometria dos cordões realizados com alimentação tangencial, diferentemente do que é prometido pelo fabricante.

Figura 3.30 - Influência das posições de inserção de arame sobre a Va atingida com o sistema TOPTIG (tangencial) e TIG convencional (radial)



Fonte: (GODINHO, 2017)

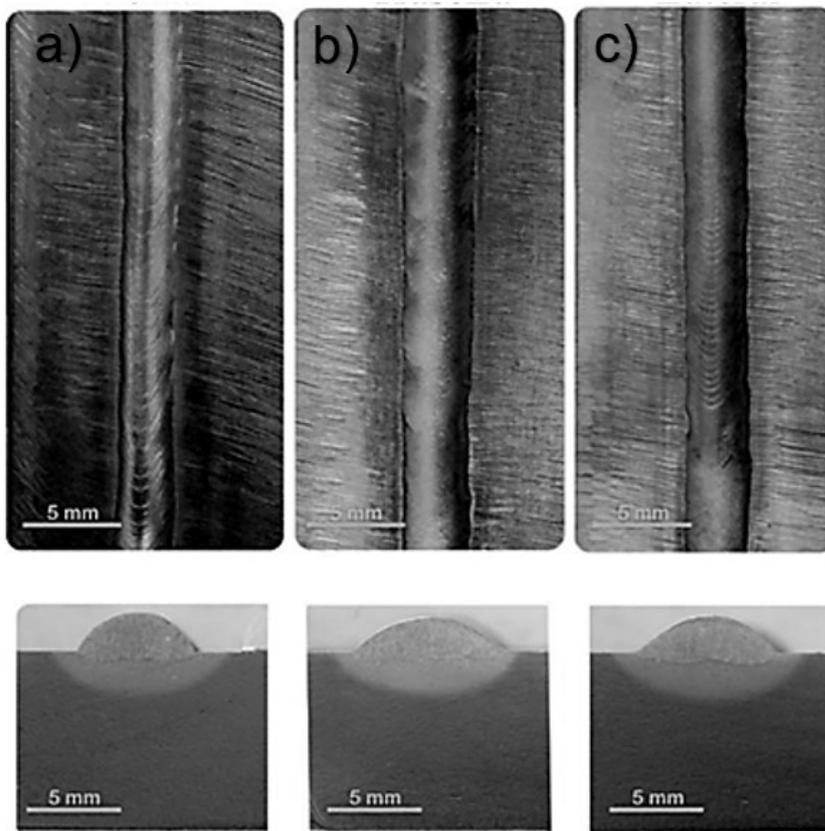
Figura 3.31 – Comparação entre diferentes processos de soldagem relacionando a taxa de fusão de arame com a potência média



Fonte: (GODINHO, 2017)

Para avaliar a influência da orientação na inserção de arame, foram realizados ensaios sobre chapa com corrente de 220 A e velocidade de alimentação de 2,4 m/min (GODINHO, 2017). Embora seja possível verificar, através da Figura 3.32, uma diferença visível entre a geometria dos cordões, principalmente em relação a convexidade, o autor conclui que o processo se mostra promissor em aplicações com diferentes posições de inserção de arame e que esta condição não pôde ser atingida com a utilização do processo TIG alimentado convencional.

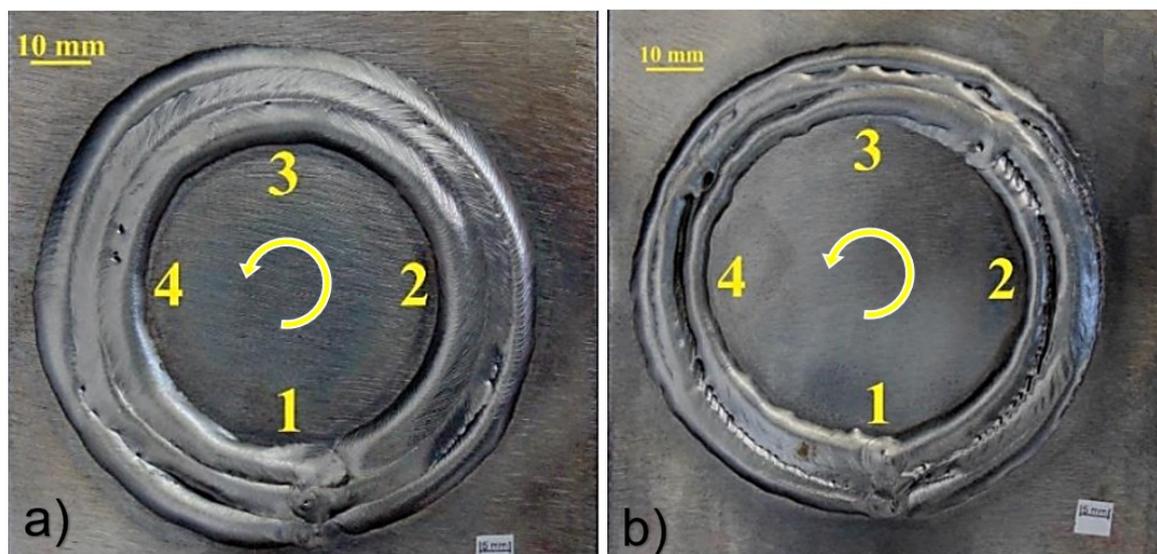
Figura 3.32 - Influência das posições de inserção de arame sobre a geometria dos cordões: a) inserção frontal b) traseira c) lateral



Fonte: Adaptado (GODINHO, 2017)

De modo a avaliar a alimentação tangencial para aplicações de revestimento, além dos ensaios realizados sobre chapa, foram caracterizadas as diferentes posições de inserção de arame na poça de fusão executando procedimentos com trajetória circular, conforme ilustrado na Figura 3.33 (GODINHO, 2017).

Figura 3.33 – Cordões depositados sobre chapa em trajetória circular para evidenciar a influência da posição de inserção do arame em procedimentos de revestimento. a) Alimentação tangencial b) alimentação radial. 1) Lateral 2) frontal 3) lateral 4) traseira.



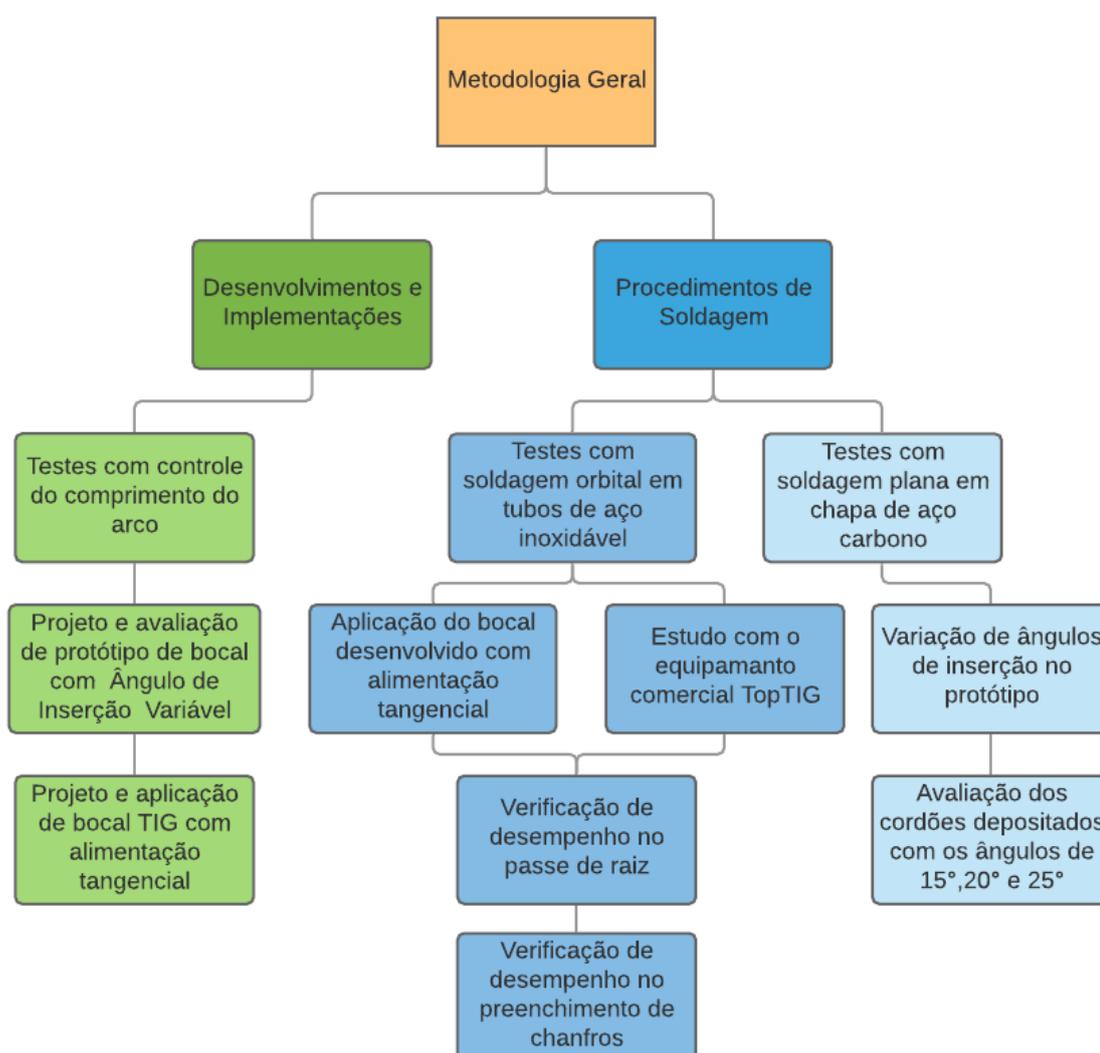
Adaptado de (GODINHO, 2017)

Segundo os resultados apresentados pelo autor, a operação do processo TIG com alimentação denominada radial, evidenciou maior dificuldade na operacionalidade do processo com a trajetória circular. É possível perceber, com auxílio da Figura 3.33a, que a alimentação tangencial não proporcionou um resultado onde a geometria do cordão manteve-se totalmente uniforme em todas as posições de inserção do arame, como divulgado pelo fabricante, ou até mesmo, livre de defeitos como falta de fusão entre os cordões. Mesmo assim, em comparação com a alimentação radial, os cordões obtidos com alimentação tangencial apresentaram uma pequena melhoria no aspecto superficial e continuidade da solda realizada em trajetória circular (GODINHO, 2017).

4. METODOLOGIA

Para atender aos objetivos propostos no presente trabalho, a metodologia para a execução dos testes no presente estudo foi concentrada em diferentes frentes de trabalho, sendo a principal delas o estudo e desenvolvimento de procedimentos de soldagem TIG orbital, no que se refere a soldagem do passe de raiz e preenchimento com diferentes equipamentos de soldagem. Um segundo grupo, relaciona as principais atividades de avaliação abordando a utilização de um robô antropomórfico na soldagem orbital e da disponibilização de dispositivos de soldagem com alimentação tangencial. De modo a promover o entendimento acerca da metodologia, os principais procedimentos experimentais delineados no trabalho são ilustrados em um organograma na Figura 4.1.

Figura 4.1 - Organograma simplificado com os principais procedimentos experimentais realizados



4.1 EQUIPAMENTOS

Com intuito de atender os objetivos propostos neste trabalho, uma bancada de ensaios foi montada, Figura 4.3, composta por uma fonte de soldagem *Air Liquide* TopTIG / DC220, na qual permite realizar o processo de soldagem TIG com corrente constante e pulsada sincronizada à alimentação de arame. Conforme informações fornecidas pelo fabricante do equipamento, o sistema atua em uma faixa de frequência de pulsação de corrente/arame entre 0,1 e 200 Hz. Apesar de não ter sido realizada uma medição para determinar até que frequência o alimentador, de fato, consegue apresentar no arame um movimento sincronizado com a corrente, é provável que acima de 20 Hz já não seja possível perceber diferença em relação à alimentação de arame contínua. O cabeçote alimentador de arame opera em uma faixa de velocidade de alimentação entre 0 e 20m/min., para arames com diâmetros entre 0,8 a 1,6 mm de diversos tipos de ligas metálicas como ligas de aço, alumínio, magnésio, cobre e ligas de níquel. Neste equipamento, o sistema de abertura do arco é realizado por meio de alta frequência.

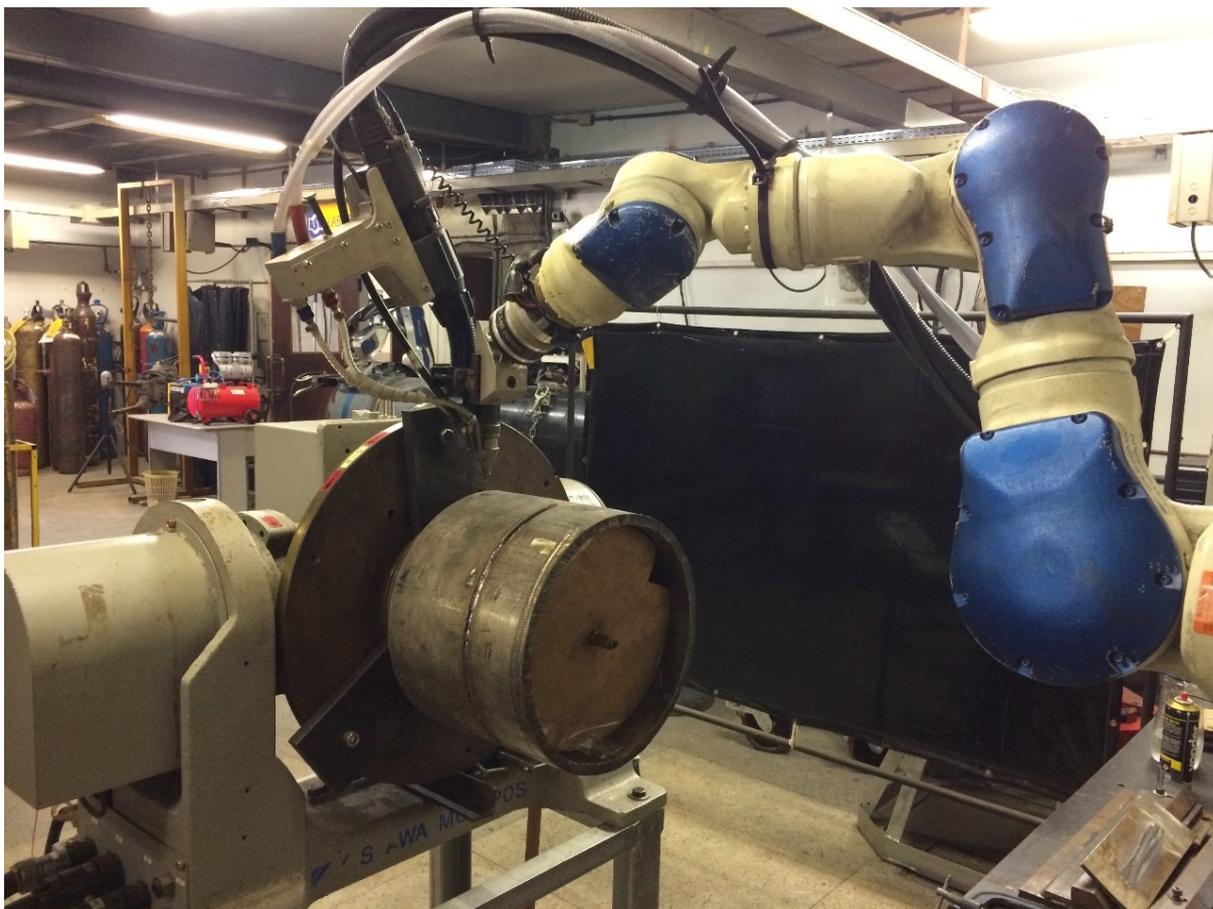
A fonte e periféricos do processo TopTIG, utilizados no presente trabalho, foram fabricados pela empresa *Air Liquide* S.A. (Figura 4.2), porém cabe ressaltar, que a versão mais atual do sistema TopTIG passou a ser distribuído pela empresa *Lincoln Electric* (Lincoln Electric, 2018). Contudo, durante a realização do trabalho, foi necessária a utilização de uma fonte auxiliar, para o estudo do procedimento de soldagem orbital e o desenvolvimento do bocal compacto com ângulo reduzido, visto que a fonte disponível da *Air Liquide* disponibiliza apenas 220A de corrente máxima, não sendo possível explorar os procedimentos de passe de raiz e preenchimento com correntes mais elevadas. Por esse motivo, nessa etapa, foi necessário realizar uma sincronização entre dois equipamentos. A corrente do processo era fornecida somente por uma fonte multiprocessos modelo IMC/MTE Digitec 600 e a alimentação de arame tangencial era realizada exclusivamente pelo cabeçote e tocha TopTIG fabricados pela *Air Liquide*. A fonte de soldagem da IMC proporciona corrente máxima de 600 A. A frequência máxima de pulsação do arame sincronizada com a corrente, nesta fonte é de 10 Hz para o processo TIG.

Figura 4.2 - Fontes de soldagem utilizadas: a) IMC / MTE Digitec 600 b) Air Liquide DC220



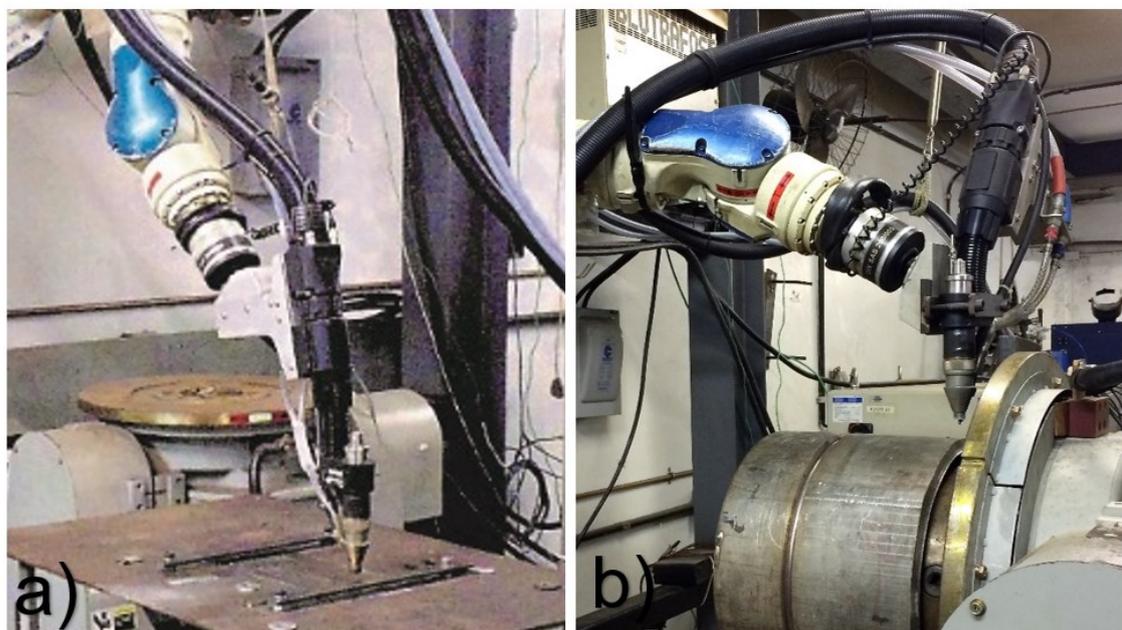
Para efetuar o deslocamento da tocha, na maior parte das vezes, o aparato utilizado em soldagem orbital são os equipamentos dedicados a este procedimento, conhecidos por cabeçotes orbitais, apresentados anteriormente no item 3.1, na Figura 3.1 e Figura 3.7. No entanto, o sistema TopTIG não permite a sua montagem nos cabeçotes, principalmente por apresentar dimensões não compatíveis com os modelos de manipuladores disponíveis. Por esse motivo, durante a fase inicial, o estudo foi conduzido utilizando um conjunto de manipulação da tocha e posicionamento dos tubos composto por um robô antropomórfico de sete eixos, *Yaskawa / Motoman SIA10D* e um posicionador *Yaskawa / Motopos* com dois graus de liberdade para fixar, posicionar e rotacionar os tubos. Nesta bancada, a tocha de soldagem precisou ser adaptada no manipulador robótico, de forma diferente da configuração original para que desta forma fosse possível realizar o movimento orbital com trajetória de 180° , conforme ilustrado na Figura 4.4.

Figura 4.3 – Bancada com robô antropomórfico Motoman SIA10D e posicionador *Motopos*



A tocha de soldagem comercial TopTIG teve que ter sua posição de fixação alterada no manipulador SIA10-D, pois a sua configuração original, não permitia gerar trajetórias orbitais na posição onde se encontrava a mesa e o manipulador, devido às limitações dos eixos do próprio manipulador. A Figura 4.4 ilustra a modificação realizada na montagem da tocha TopTIG no robô antropomórfico.

Figura 4.4 – Montagem da tocha TopTIG no robô a) Configuração original; b) Configuração adaptada para soldagem orbital



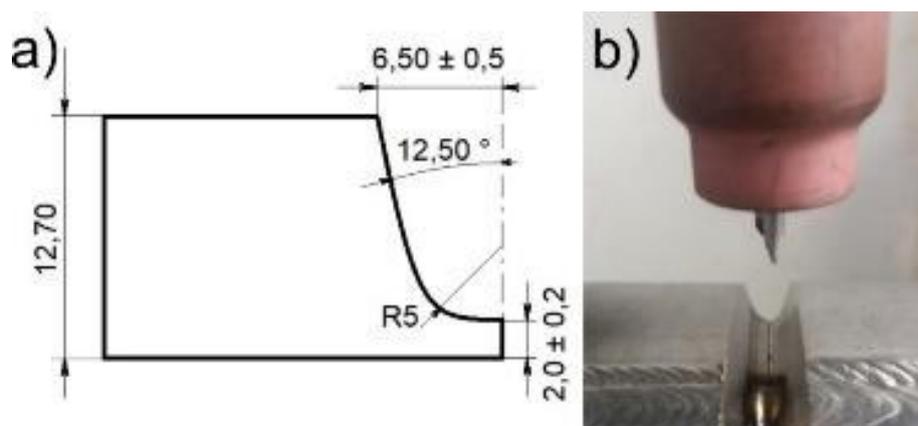
Em um segundo momento da pesquisa, após o estudo dos principais aspectos tecnológicos do emprego da alimentação tangencial na soldagem orbital com os equipamentos comerciais, passou-se a utilizar os manipuladores e a tocha de alimentação tangencial desenvolvidos no laboratório. Assim uma segunda bancada de testes foi montada. Nesta nova bancada, o deslocamento da tocha era realizado por um manipulador modelo SPS/Tartílope V4. O bocal de alimentação tangencial proposto foi montado em uma tocha TIG automática do fabricante Abicor Binzel, modelo AUT – WIG 400 W, refrigerada a água e com capacidade de corrente de até 400 A. Ferramentas de medição e monitoração de processos de soldagem, foram empregadas, como a câmera de soldagem XIRIS XCV 1000 a uma taxa de aquisição de 55 quadros por segundo e um sistema de aquisição de sinais elétricos portátil (SAP) com taxa de aquisição de 5 kHz. Demais informações sobre os equipamentos de monitoração utilizados podem ser encontradas nos referidos *websites* dos fabricantes (XIRIS, 2019) (IMC, 2019).

4.2 MATERIAIS

Na soldagem orbital, os corpos de prova que serviram como material de base consistiam em tubos de aço inoxidável 304L com costura e apresentavam 12,7 mm (meia polegada) de espessura e 304,8 mm de diâmetro interno (doze polegadas), os quais foram seccionados em pequenas amostras em formato de anéis, com aproximadamente 150 mm de comprimento (Figura 4.6). Para a soldagem do aço inoxidável foi utilizado como gás de proteção o argônio, tanto para a tocha quanto para a proteção gasosa interna ao tubo (purga) a uma vazão de 10 l/min. O material de adição na forma de arame utilizado foi o AWS ER309LSi com 1,0 de diâmetro. O projeto do bisel, está ilustrado na Figura 4.5.

Figura 4.5 – Detalhamento do bisel tipo J fabricado nos tubos para os testes de soldagem TIG orbital

a) detalhamento do bisel b) junta montada



Os chanfros fabricados nos corpos de prova, foram usinados por uma chanfradeira/biseladora hidráulica de tubos, da marca PROTEM. Após seccionados, dois anéis eram montados manualmente com auxílio de componentes internos de fixação soldados entre eles no interior do tubo, de modo a fixá-los para formar a junta. Nesta etapa de montagem, buscou-se diminuir os efeitos de desalinhamento (abertura) e desnivelamento (*high-low*) ocasionado pela ovalização, inerente do processo de fabricação do tubo.

Figura 4.6 – Anéis seccionados dos tubos utilizados nos testes de soldagem TIG orbital



Após a montagem da junta, o corpo de prova era inserido no posicionador MOTOPOS e fixado. Devido a não padronização dimensional da fabricação dos anéis, acarretando em uma variação da posição da junta no espaço, a trajetória da tocha no robô era programada manualmente a cada conjunto de anéis montados na bancada.

É importante ressaltar, que os tubos utilizados no presente trabalho foram fabricados sob encomenda, a partir de chapas de aço inoxidável, calandradas e soldadas pelo processo TIG manual. Desta forma, não se tinha um controle dimensional exato em relação à ovalização, por exemplo. Em alguns casos, não foi possível obter as dimensões especificadas na Figura 4.5 com a chanfradeira, principalmente a espessura uniforme do nariz. Assim, após algumas juntas fabricadas, optou-se em realizar o processo de fabricação dos chanfros através de torneamento convencional, de modo a tentar eliminar a variação das dimensões do chanfro no tubo e manter a repetibilidade das dimensões. Para tanto, necessitou-se realizar um adoçamento na face interna do tubo por torneamento interno. Após, foi realizado a usinagem externa do tubo. Desse modo, foi possível garantir que a espessura do nariz se mantivesse constante em toda circunferência do corpo de prova, o que por consequência, proporcionou uma pequena alteração no projeto do chanfro apresentado na Figura 4.5. A modificação reduz a espessura total da parede do tubo, contudo, manteve-se a espessura do nariz em 2 mm, sendo possível verificar essa alteração no item 5.4, referente aos resultados da soldagem orbital, apresentadas no final deste trabalho. A composição química do tubo, disponibilizada pelo fabricante, é

ilustrada na Tabela 1. As amostras das juntas soldadas foram atacadas quimicamente com o reagente Marble pelo método de imersão durante dez segundos.

Tabela 1 - Composição química dos tubos de aço inoxidável 304 utilizados como corpos de prova

C %	Mn %	Si %	P %	S %	Cr %	Ni %	Mo %	Al %	Cu %	N PPM
0,0034	1,19	0,480	0,0282	0,0006	17,59	8,00	0,034	0,0028	0,0621	379

4.3 MÉTODOS

4.3.1 Necessidades tecnológicas e implementações

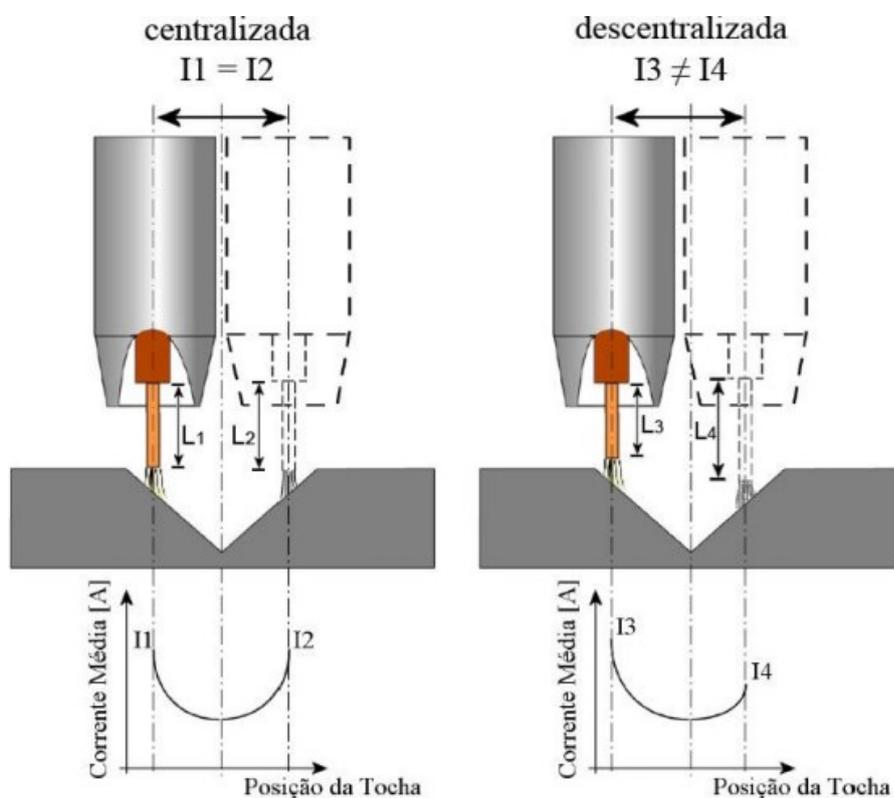
Para que o procedimento de soldagem orbital fosse conduzido de forma satisfatória ao longo do trabalho, além da mudança de posição da tocha TopTIG no manipulador robótico, algumas necessidades de cunho tecnológico foram notadas durante os primeiros procedimentos de soldagem realizados. Por exemplo, mesmo fazendo uma programação minuciosa dos pontos no robô de soldagem, não era possível obter uma variação na DEP suficientemente pequena. Também se fez necessário construir um dispositivo capaz de alterar os ângulos de inserção do arame e que fosse capaz de proporcionar o estudo dos ângulos de inserção e, posteriormente, a partir dos resultados obtidos, fabricar um bocal com alimentação tangencial. Essas implementações correspondem a área verde do organograma da Figura 4.1 e serão apresentadas e discutidas nos itens seguintes.

4.1.1.1 Controle do comprimento do arco

No presente trabalho, para que o robô Motoman SIA10-D corrigisse o comprimento do arco para um valor de tensão de referência regulado, foi necessário realizar uma modificação no princípio de funcionamento do subsistema COMARC III para atuar com o processo TIG. Este subsistema é considerado como uma solução da *Motoman* para correção automática de trajetória, no processo MIG/MAG, utilizando os valores dos sinais elétricos gerados pelo arco. O princípio de funcionamento do COMARC III consiste na interpretação da posição da tocha em relação à junta, por

meio da análise da corrente elétrica, em processos controlados por tensão, como o MIG/MAG convencional, ou seja, não é adequado para ser utilizado no processo TIG. Nesses casos, a corrente média varia durante a transição entre o centro e a lateral da junta. A variação do valor da corrente, dentro do chanfro, pode ser melhor compreendido com auxílio da Figura 4.7.

Figura 4.7 – Variação da corrente de soldagem do processo MIG/MAG convencional dentro de uma junta chanfrada

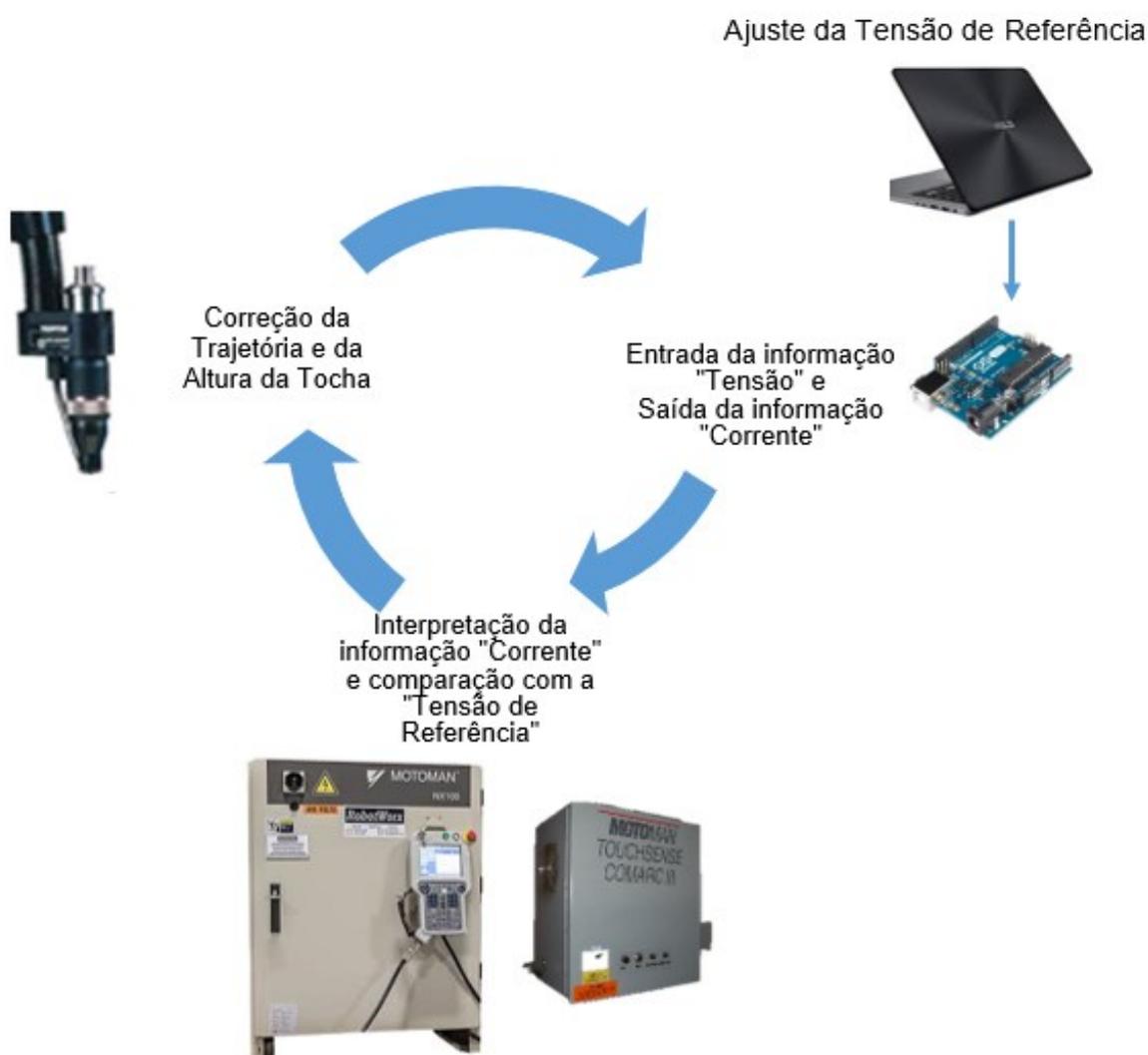


Fonte: (MENDONÇA, 2013)

Os picos da corrente média são registrados pelo COMARC III com auxílio de um sensor hall e seus valores determinam a distância de aproximação entre a tocha e a peça, enquanto a diferença entre esses picos determina a posição lateral da tocha em relação à junta (MENDONÇA, 2013). No processo TIG, a corrente de soldagem é mantida constante pela fonte, ou seja, não existe uma variação significativa nesse sinal. Desse modo, a tensão é a variável que oscila durante o processo, sendo sua variação influenciada fundamentalmente pelo nível de corrente, pelos gases utilizados no processo e pelo comprimento do arco. Neste caso, necessariamente, o que deve ser analisado pelo COMARC III é o sinal de tensão, o qual este subsistema não é

diretamente preparado para analisar. Para tanto utilizou-se um microcontrolador para converter o sinal de tensão adquirido. Desta forma, foi desenvolvida uma lógica de programação na qual o valor de tensão adquirido do arco TIG é convertido em valor equivalente que representa, para o COMARC III, valor de corrente média. Assim, o valor da tensão do arco TIG, que é diretamente proporcional ao comprimento do arco, é interpretado como valor de corrente média pelo sistema COMARC III e este realiza as correções de deslocamento de tocha como se estivesse operando com um processo MIG/MAG convencional. Na Figura 4.8 é ilustrado um esquema dos principais elementos e funcionamento do sistema, onde a tensão de referência é regulada no código fonte do microcontrolador com auxílio de um computador.

Figura 4.8 – Esquema representativo do sistema do controle de comprimento do arco TIG no procedimento orbital



4.1.1.2 *Construção do Protótipo de bocal com ângulo variável*

Para atender ao objetivo de avaliar diferentes ângulos de alimentação optou-se por projetar e construir um protótipo para avaliar se outros ângulos de inserção do arame oferecem alguma vantagem para o processo. Dado o proposto, o desafio inicial foi criar um dispositivo capaz de alterar o ângulo de inserção de arame com um ajuste contínuo variando entre 10 e 30° relativo ao eixo do eletrodo de tungstênio. Nesse sentido, foi utilizado o *software* CAD - *SolidWorks* para modelar todas os componentes que compunham o protótipo que, como premissa, deveria ser compacto a ponto de interferir o mínimo possível nas capacidades normais de uma tocha de soldagem convencional, além de permitir acesso em locais de pequenas dimensões.

4.1.2 **Procedimentos de Soldagem**

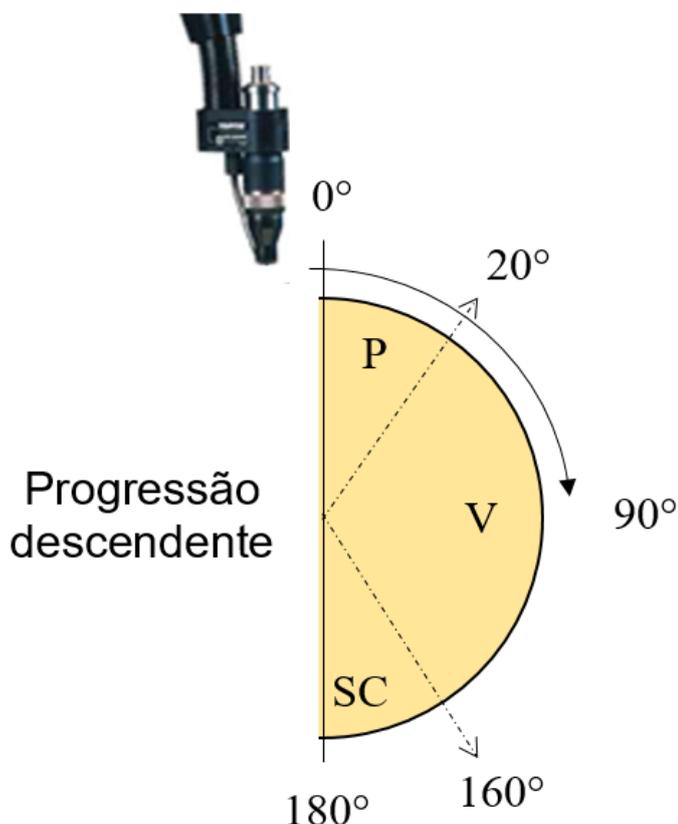
4.1.2.1 *Soldagem Orbital de Raiz e Preenchimento*

Considerado como um dos principais aspectos deste estudo a avaliação da tecnologia de alimentação tangencial para a soldagem orbital, foram realizados os testes exploratórios de soldagem do passe de raiz e preenchimento dos chanfros, correspondente à área azul do organograma da Figura 4.1. No presente trabalho, a soldagem do passe de raiz aconteceu por meio de dois modos operacionais, *keyhole* e *melt-in*. Tratando-se de um estudo exploratório, principalmente de processo, os valores de corrente e velocidade de soldagem foram os parâmetros variados durante os ensaios, onde se procurava determinar as melhores faixas de operação dentro de condições aceitáveis para o procedimento. Esses dados serão discutidos na seção de resultados do presente trabalho. Além disso, a efeito de comparação e levantamento de informações técnicas, a soldagem do passe de raiz e preenchimento foi realizada com a tocha comercial, de modo a avaliar as características operacionais da soldagem orbital com uma variante inovadora do processo TIG e posteriormente, aplicar as condições mais favoráveis na utilização do bocal desenvolvido, para que seja, de certa forma, validada a sua aplicação. Aspectos como a utilização de corrente constante ou pulsada foram investigados.

Os experimentos foram conduzidos na posição 5G em uma trajetória de 180° do tubo com os equipamentos manipuladores, robô antropomórfico e cabeçote orbital. Desse modo, a tocha foi posicionada no início da região da posição plana (P), definida no presente trabalho na posição 0° (12h) e realizava a trajetória orbital, incidindo pela posição vertical (V), definida entre 20° e 160°, com progressão descendente até a posição sobre cabeça (SC), situada entre 160° e 180° conforme ilustrado na Figura 4.9. Esta metodologia foi adotada baseada em estudos realizados com soldagem orbital anteriores (KINDERMANN, 2016) (PIGOZZO, 2015) (PAES, 2016).

Na posição vertical ascendente, a probabilidade da ocorrência de defeitos como *humping* e perfuração (*melt through*) é aumentada (CHO, *et al.*, 2013). Segundo esses autores isto ocorre devido à poça de fusão escorrer no sentido oposto à direção da velocidade de soldagem. Nesse contexto à formação de mordeduras na posição vertical ascendente também é iminente (SHIRALI e MILLS, 1993). Com o intuito de mitigar a incidência dos defeitos causados por essa progressão da tocha (ascendente), o presente trabalho utilizou preferencialmente a posição vertical descendente. O tubo foi, portanto, soldado em 180° (meio tubo) nas posições ilustradas na Figura 4.9. Essa estratégia, demonstrou elevado potencial para a realização de estudos sobre soldagem orbital em outros trabalhos já concretizados no LABSOLDA e citados anteriormente, tanto para o processo TIG quanto para o processo MIG/MAG. Nos testes, a programação da trajetória orbital do robô era feita através da marcação de, normalmente, sete pontos com movimentação circular, ao longo da meia circunferência, com a DEP constante de 3mm.

Figura 4.9 – Metodologia de manipulação da tocha utilizada no procedimento de soldagem TIG orbital. P – Posição plana, V – Vertical, SC – Sobre cabeça



Ao contrário do que acontece em alguns casos em soldagem orbital, onde se investiga o procedimento sobre chapas em diferentes posições de soldagem, o presente estudo foi realizado diretamente na junta dos tubos na progressão descendente, entre a posição plana, definida em 0° até a posição sobre cabeça, definida em 180° . Também está justificado por uma maior facilidade de fabricação dos corpos de prova, tendo em vista que o equipamento da junta em U possui disponibilidade apenas para fabricar chanfros em tubos.

Após a soldagem do passe de raiz é necessário realizar o passe de preenchimento da junta. É comum, em campo, a utilização do eletrodo revestido ou do processo MIG/MAG para a conclusão desta etapa, principalmente em tubos de aço carbono. Entretanto, defeitos entre passes como inclusão de escória, no eletrodo revestido, e falta de fusão no MIG/MAG, são bem recorrentes. Assim, seguindo a mesma metodologia da soldagem do passe de raiz, nos primeiros testes de preenchimento dos chanfros, optou-se em estudar o desempenho do processo TIG com alimentação tangencial na soldagem orbital, visando o aumento da produtividade,

considerando a taxa de alimentação de arame e a velocidade de soldagem. O preenchimento dos chanfros aconteceu utilizando uma parametrização similar a utilizada no passe de raiz, no entanto, em virtude da largura do chanfro e com o intuito de garantir que não ocorresse defeitos de falta de fusão, principalmente nos flancos, optou-se em utilizar movimentação oscilatória da tocha (tecimento).

4.3.1.1 Soldagem com o Protótipo de Ângulo de Inserção Variável

Para avaliação dos limites operacionais com diferentes ângulos de alimentação usando o protótipo de ângulo de inserção variável, foi estabelecida a seguinte metodologia: iniciou-se o processo a partir de uma corrente e velocidade de arame pré-estabelecida aumentando-se gradativamente seus valores com a tocha fixada em um dispositivo manipulador automático Tartilope V4. Foram realizados depósitos sobre chapa de aço carbono SAE 1020 com espessura de 9,53 mm e com avanço de 0,15 m/min, em trajetória linear. Foi mantida a corrente de soldagem em 200 A e iniciou-se os procedimentos de soldagem com uma velocidade de alimentação de 1,0 m/min, e a cada 7 segundos a V_a era acrescida em 0,5 m/min. Com essa metodologia, pretendia-se averiguar quando e em qual faixa operacional a transferência metálica por ponte ocorria, pois, se tratava da transferência desejável nas soldagens orbitais. A verificação do destacamento das gotas de metal fundido da ponta do arame pode ser conferida por meio da análise do sinal de tensão do arco, o qual apresenta uma perturbação no sinal quando a ponte metálica é rompida. Após essa verificação, foi realizado depósito sobre chapa de modo a averiguar a seção transversal das diferentes condições testadas. Durante os testes, os valores de corrente e tensão do arco foram adquiridos com o SAP, e os dados foram analisados posteriormente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item serão apresentados e discutidos os principais resultados obtidos durante a realização do presente trabalho. Cabe esclarecer previamente que a secção dos resultados foi dividida em três etapas.

A primeira etapa aborda as adequações realizadas no equipamento manipulador, como o desenvolvimento de um sistema experimental de controle do comprimento do arco no robô antropomórfico. Na segunda parte, será apresentado os principais aspectos construtivos pertinentes ao protótipo com ângulo de inserção variável e ao projeto do bocal TIG compacto com inserção de arame em ângulo fixo, principais componentes e testes realizados. Por fim, na última e terceira parte, serão evidenciados e discutidos os principais resultados e aspectos tecnológicos da soldagem orbital com a utilização dos equipamentos desenvolvidos no LABSOLDA e o modelo comercial TopTIG.

5.1 IMPLEMENTAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA DE CONTROLE DO COMPRIMENTO DO ARCO TIG EM UM ROBÔ ANTROPOMÓRFICO

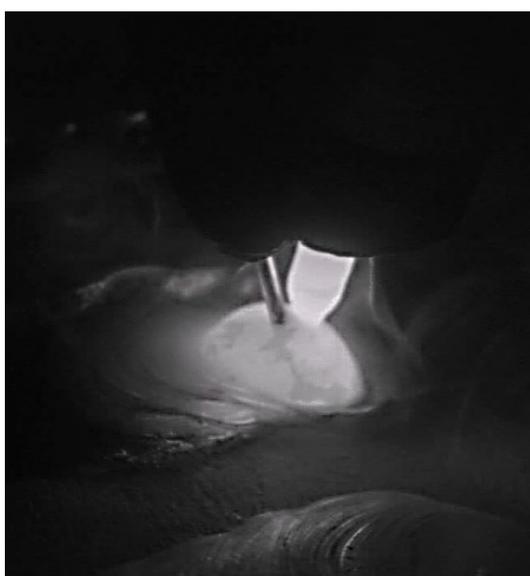
Quando os robôs manipuladores são programados para executar uma trajetória específica, a repetibilidade e a execução do movimento tendem a ser uniformes. No contexto da soldagem automatizada em aplicações industriais, é esperado que o posicionamento das peças em gabaritos contribua com a repetibilidade da solda. Porém, em alguns casos, como a soldagem orbital de tubos, é impraticável a utilização de um gabarito, além de que, a peça possui variações geométricas consideráveis. Por isso, se faz necessário um sistema que interprete as informações de posição da junta ou o comprimento de arco e atuem na correção do deslocamento da tocha, lateral ou vertical, ou em ambos ao mesmo tempo. Este tipo de controle pode ser feito manualmente pelo operador por meio de manípulos eletrônicos (*joysticks*) em sistemas de soldagem considerados como mecanizados ou de forma automática por robôs antropomórficos, previamente programados para isso.

Para que as correções da trajetória sejam realizadas de forma automática é necessário que, de alguma forma, o manipulador da tocha identifique as imperfeições da junta e realize as devidas correções, para que não haja colisão da tocha ou do eletrodo de tungstênio, causando descontinuidade na solda. Na soldagem

automatizada, é possível utilizar sensores que interpretam a posição da tocha na junta, como um sensor laser, por exemplo. Porém, o sensoriamento laser é uma opção que ainda apresenta um custo relativamente elevado. Além disso, alguns robôs antropomórficos também permitem a utilização do próprio arco elétrico como sensor. Assim, os manipuladores são realimentados com algum tipo de sinal de referência para que, desta forma, interprete a posição da tocha e execute a soldagem de maneira adaptativa aos obstáculos ou perturbações presentes no procedimento.

No processo TIG automatizado de forma geral, é fundamental manter o comprimento do arco de forma constante, ou seja, DEP constante, independentemente da geometria da junta e variações dinâmicas da poça de fusão. No presente trabalho, foram realizados testes onde a programação da trajetória orbital era feita somente através da marcação de, normalmente, sete pontos ao longo da meia circunferência, com a DEP constante de 3 mm. Devido a programação da trajetória ser realizada sem a presença do arco, não era possível prever o comportamento dinâmico da poça dentro do chanfro. Desta forma, não foi possível realizar as soldas de forma satisfatória. Tal estratégia de movimentação contribuiu fortemente para o contato do eletrodo com a poça em determinadas partes do chanfro, conforme é ilustrado na Figura 5.1

Figura 5.1 – Toque do eletrodo na poça de fusão sem a utilização do sistema de controle do comprimento do arco



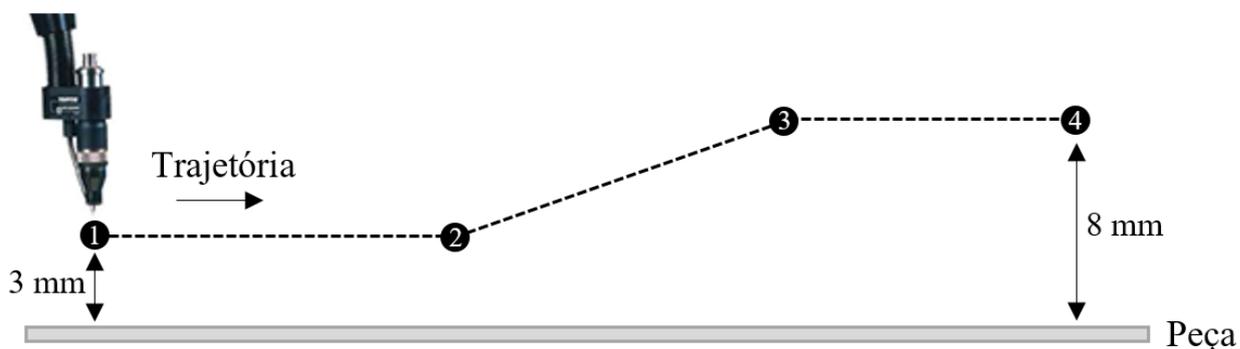
Ao contrário do processo MIG/MAG convencional, o comprimento do arco TIG varia quando se altera a distância entre a tocha e a peça. O fato é que no MIG/MAG o arame é alimentado continuamente. Assim, frente a variações da posição da tocha, existe uma autoregulação da intensidade da corrente alterando a taxa de fusão do arame e conseqüentemente o comprimento do arco (SCOTTI e PONOMAREV, 2014). Desta forma, no processo TIG automatizado, o manipulador robótico é o único responsável por manter o comprimento do arco constante e estável, aumentando a dependência entre ambos que, neste caso, é ainda maior que no MIG/MAG convencional. Conseqüentemente, por esse motivo, o uso do arco elétrico como sensor para coletar informações de distância, pode ser considerado como uma ferramenta muito útil e eficiente desta tecnologia no processo TIG (LORCH, 2015).

5.1.1 Desempenho do controlador do comprimento do arco TIG no manipulador robótico

Após a implementação e montagem do sistema controlador do arco experimental, foram realizados diversos testes para conferir o seu funcionamento e desempenho. Vários testes foram realizados similares ao da Figura 5.2, o qual consistiu na programação de uma trajetória a ser executada pelo robô com diferentes níveis de altura (perturbações) para verificar e analisar a sua atuação. Com a utilização desta estratégia pretendia-se realizar somente a leitura do sinal de tensão para que, posteriormente, fosse averiguado a dinâmica de atuação e correção do comprimento do arco antes de ser utilizado na soldagem orbital.

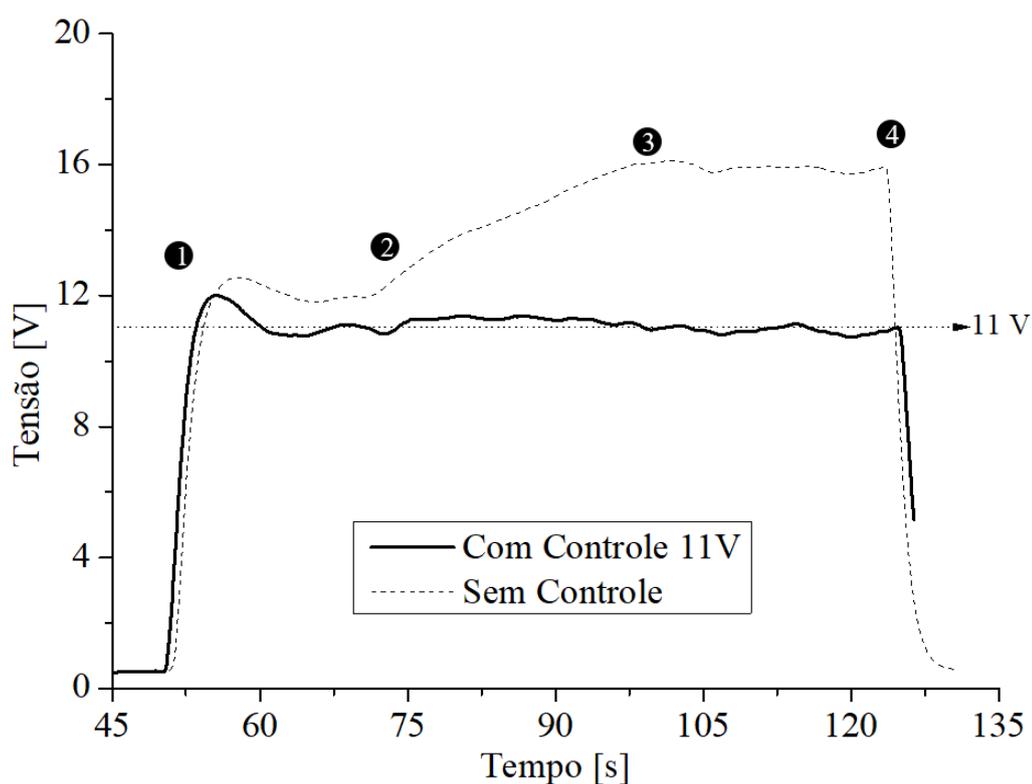
Uma trajetória com movimentação linear foi programada no robô, com quatro pontos e uma distância inicial entre o eletrodo e a peça de 3 mm, seguida de uma inclinação, variando a altura final para 8 mm, de forma idêntica à representação didática ilustrada na Figura 5.2. A velocidade de soldagem adotada para este teste foi de 0,1 m/min.

Figura 5.2 – Representação da trajetória programada no robô com diferentes níveis de altura para verificação do comportamento da tensão em soldagem na posição plana



Neste teste, os pontos numerados de 1 a 4 na Figura 5.2, são os mesmos representados na Figura 5.3, onde são relacionados com os sinais de tensão obtidos. Na Figura 5.3 é possível verificar a leitura do sinal de tensão obtido durante a trajetória proposta, ou seja, o sinal adquirido sem qualquer tipo de controle (linha tracejada), e o sinal de tensão obtido após a atuação do sistema de controle do comprimento do arco TIG (linha contínua), implementado no robô. Este teste foi conduzido utilizando corrente constante, regulada na fonte em 220 A com gás argônio.

Figura 5.3 – Mapeamento do sinal da tensão realizado em soldagem plana com perturbações programadas na trajetória



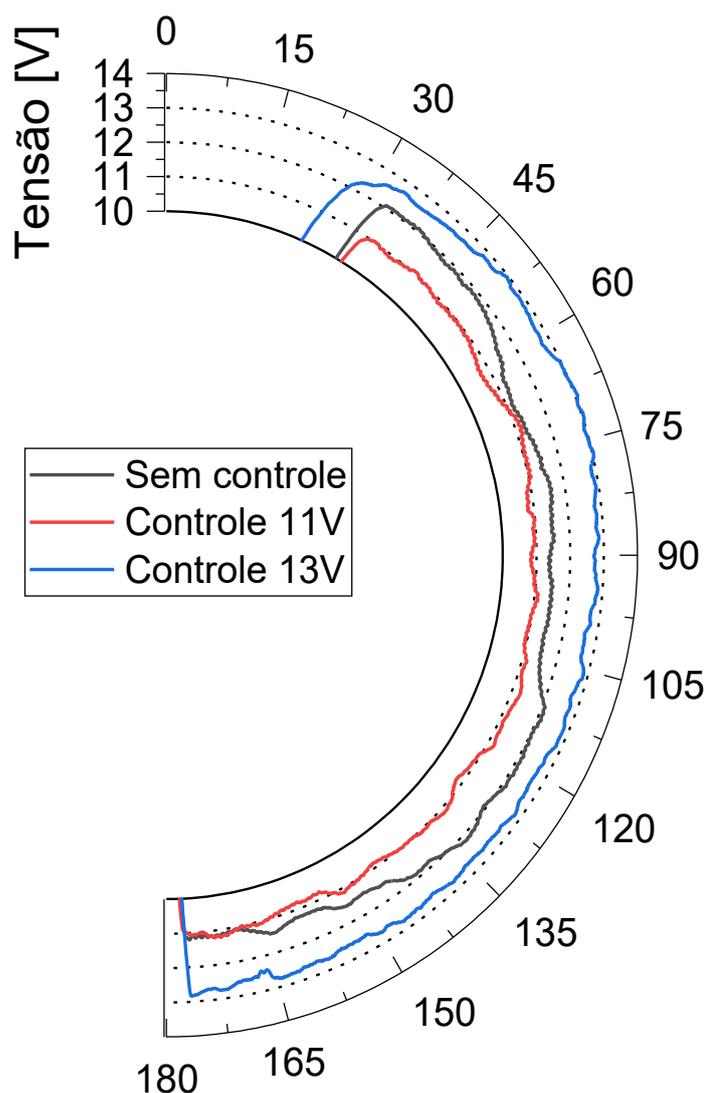
Na linha tracejada do gráfico da Figura 5.3, o comportamento da tensão acontece de forma já esperada para o processo TIG, ou seja, com o aumento da DEP aumenta-se a tensão do arco. Com a atuação do controle do comprimento do arco, representada pela linha contínua no gráfico da Figura 5.3, é possível perceber que o sinal da tensão se estabiliza entre os quatro pontos da trajetória se mantendo próximo à tensão de referência, regulada em 11 V. Cabe ressaltar que o valor da tensão de referência, neste caso 11 V, foi definido e regulado baseado em uma verificação da altura do arco para a corrente de 220 A, realizada em soldagem na posição plana em chapa de aço carbono, o que representa um comprimento de arco de 3 mm.

Ainda a partir da Figura 5.3, verifica-se a presença de um pico inicial da tensão, após o primeiro ponto, nos dois sinais obtidos. Esta é uma das limitações que pode ser apontada ao sistema de controle, caracterizada por um atraso entre a interpretação dos sinais e o início da atuação da correção, numa faixa entre 3 a 4 segundos. Acredita-se, que a própria estabilização do valor da tensão no arco TIG, contribua para este pico inicial da tensão. O atraso no controle da altura do arco, acentua-se ainda mais devido a abertura do arco ser efetuada pelo método de alta frequência, caracterizada por pulsos de alta tensão em frequência elevada. Nesta condição, os equipamentos de monitoração e de controle, podem ser danificados. Por esse motivo, os cabos do microcontrolador que realizam a medição da tensão são conectadas no equipamento de soldagem de forma manual pelo operador, imediatamente após a abertura do arco, preservando assim a integridade do equipamento de controle acoplado ao circuito. Além disso, esta é a causa pela qual os sinais de tensão não podem ser registrados desde o início da soldagem, característica encontrada em alguns procedimentos utilizando o processo TIG com abertura do arco por alta frequência.

Após a verificação da altura do arco em relação à junta e a definição do valor de tensão de referência, foram realizados testes similares de desempenho do controlador, porém diretamente dentro da junta do tubo a ser soldado e de forma autógena. Nestes testes, manteve-se a mesma metodologia da chapa plana com 220 A, porém, mantendo a altura uniforme de 3 mm, desta vez em sete pontos programados. Foram testados valores de tensão de referência os quais representavam comprimento de arco menor (11 V) e maior (13 V) no robô. Os sete pontos foram marcados ao longo da junta, nos 180° do tubo, iniciando da posição plana e terminando na posição sobre cabeça. De maneira didática, o gráfico da Figura

5.4 representa a meia circunferência do tubo, de modo a ilustrar de modo qualitativo a relação entre o sinal da tensão com a variação do comprimento do arco na superfície da junta.

Figura 5.4 – Mapeamento dos sinais da tensão realizado durante soldagem orbital dentro do chanfro.
(Corrente: 220 A, Gás: Argônio, Vazão: 12 l/min)



Os sinais de tensão obtidos nesse teste demonstram que o controle se manteve dentro das tensões de referência programadas no microcontrolador. Considerando a curva referente ao processo sem controle nenhum, onde somente os pontos da trajetória do robô foram marcados ao redor do tubo, nota-se que o sinal oscilou entre 12 e 10 V. Com a regulação da tensão de referência em 11 V, agora já de forma controlada, o processo resultou em uma tensão média de 10,9 V (linha

vermelha). Esta característica também é verificada quando foi regulado um valor de referência mais elevado, em 13 V, sobre o qual o processo resultou em uma tensão média de 12,6 V. A partir destes resultados considerou-se, durante a realização do trabalho, que o controlador experimental apresentava capacidade para ser empregado nos testes de soldagem orbital.

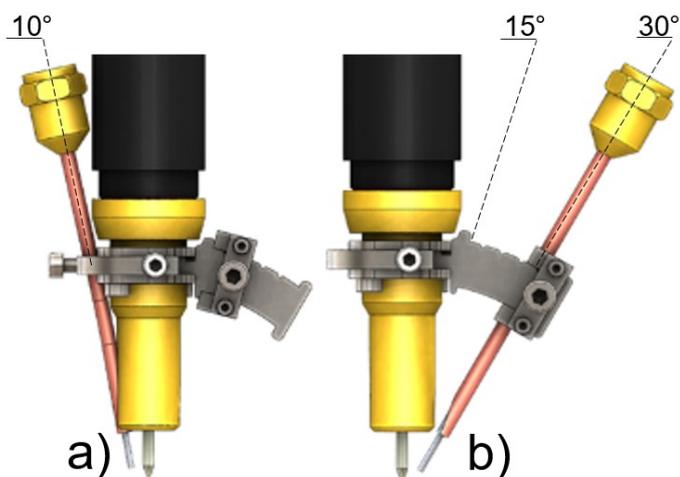
5.2 DESENVOLVIMENTO DE UM BOCAL TIG COMPACTO COM ÂNGULO REDUZIDO DE INSERÇÃO DE ARAME

Com o intuito de atender um dos objetivos deste trabalho, o presente estudo se propôs a disponibilizar um sistema composto por um bocal e um direcionador de arame que permitisse o estudo dos diferentes ângulos de inserção de arame no processo TIG. Da mesma forma, que tal dispositivo fosse capaz de ser integrado a equipamentos orbitais. Assim torna-se possível simular, em termos construtivos e operacionais, as vantagens que o sistema TopTIG oferece. Outrossim torna-se possível também expandir a flexibilidade e a versatilidade da infraestrutura, permitindo, portanto, uma maior gama de investigações e aplicações acerca da técnica de inserção de arame em um ângulo fixo, próximo ao eletrodo. Sendo assim, neste item serão descritas as principais etapas do projeto, testes e funcionalidades do bocal TIG compacto com inserção de arame em ângulo fixo.

5.2.1 Protótipo desenvolvido para avaliar a influência do ângulo de inserção de arame

No protótipo desenvolvido utilizou-se como base uma tocha TIG reta automática onde optou-se, também, por utilizar um porta-pinça com difusor de gás de proteção integrado, ao invés de utilizar um sistema *gas lens*. Esta opção contraria a utilização comum e recomendada da tocha, em contrapartida se justifica pelo fato de que o conjunto porta-pinça/difusor de gás possui dimensões reduzidas em relação ao sistema *gas lens*, o que diminui consideravelmente as dimensões do bocal. Além disso, como a intenção era realizar somente um estudo específico, buscou-se um baixo custo de fabricação dos componentes. O modelo proposto do bocal com ângulo de inserção de arame variável foi projetado no *software SolidWorks* e está ilustrado na Figura 5.5.

Figura 5.5 - Modelo do projeto do bocal em ambiente CAD para estudo do ângulo de alimentação, evidenciando os extremos de regulagem (10 e 30°)



O protótipo possui um componente ajustável que possibilita a variação do ângulo de inserção entre 30 e 15° de um lado (Figura 5.5b), e 10° no lado oposto (Figura 5.5a). Para fixar o bocal foi utilizada uma tocha TIG automática convencional, de modo a facilitar a execução dos testes e a utilização dos sistemas já compostos na tocha, como o sistema de refrigeração e proteção gasosa, minimizando os requisitos de projeto. Após o entendimento das vantagens e limitações e com base nos resultados obtidos do protótipo com ângulo variável foi projetado e fabricado um bocal com alimentação tangencial com o ângulo considerado mais adequado. A montagem final do protótipo de ângulo variável pode ser verificada na Figura 5.6

Figura 5.6 – Protótipo de bocal utilizado para analisar a influência do ângulo de inserção do arame no processo TIG



Após a realização dos primeiros testes foram encontradas e estão relatadas nos parágrafos seguintes algumas limitações apresentadas pelo protótipo de ângulo variável. A rosca fabricada no corpo da tocha, que tinha como função fixar o bocal não resistiu ao frequente manuseio do equipamento, tendo em vista que diversas vezes o bocal metálico necessitou ser retirado do corpo da tocha, para alterar os ângulos de inserção de arame nos testes. Isto se deve principalmente ao fato de que o corpo da tocha seria fabricado em Celeron, produto obtido da combinação de tecidos de algodão com resinas sintéticas, laminado a alta pressão, enquanto a rosca do bocal seria fabricada em alumínio. Com a rosca danificada, a montagem do bocal o deixava com desalinhamento em relação ao eletrodo. Para suavizar esta condição, optou-se em utilizar parafusos no sentido radial entre o bocal e o corpo da tocha para fixar estes dois componentes, sendo assim, possível terminar os testes. O tubo de cobre, o qual servia como direcionador do arame, apresentou maleabilidade excessiva, devido ao momento de inércia gerado algumas vezes pelo conduíte do arame quando este não estava totalmente preso ao corpo da tocha. Esta problemática não permitia o correto posicionamento de inserção de arame na poça de fusão, visto que, somado ao desalinhamento concêntrico entre o bocal e o eletrodo, este fato era intensificado, pois, caso o bocal estivesse desalinhado, o direcionador também perdia o alinhamento com o eletrodo.

Foi verificado, durante os testes com o protótipo, o elevado aquecimento do componente. Este fator demonstrou ser um ponto negativo no manuseio do componente, principalmente quando se deseja trocar o ângulo de inserção do arame. Além disso, o aquecimento excessivo dos componentes metálicos do bocal e do direcionador limita o ciclo de trabalho do equipamento. Outro ponto averiguado, considerado importante, foi o limite para a correta atuação da proteção gasosa no processo. No protótipo, com o ângulo de inserção de arame ajustado em 10° , o eletrodo permanecia de forma proeminente para fora do bocal. Ao fazer o ajuste da distância eletrodo-arama, foi observado uma severa ineficiência e instabilidade na atuação da proteção gasosa, o que conseqüentemente causou oxidação e porosidade excessiva nos cordões de solda. Quando utilizado o ângulo de 30° , na maioria dos testes, os cordões não apresentaram uniformidade. Para evidenciar a importância da proteção gasosa no processo e uma condição adequada de inserção de arame, a Figura 5.7 ilustra exemplos de cordões de solda fabricados sobre chapa, com os ângulos de inserção de arame de 10° e a formação do cordão com o ajuste em 30° .

Figura 5.7 – Exemplos da aparência superficial dos cordões realizados com inserção de arame com 10° (cordão superior) e 30° (cordão inferior). Corrente: 200 A, Vs: 015 m/min, Va inicial 1m/min



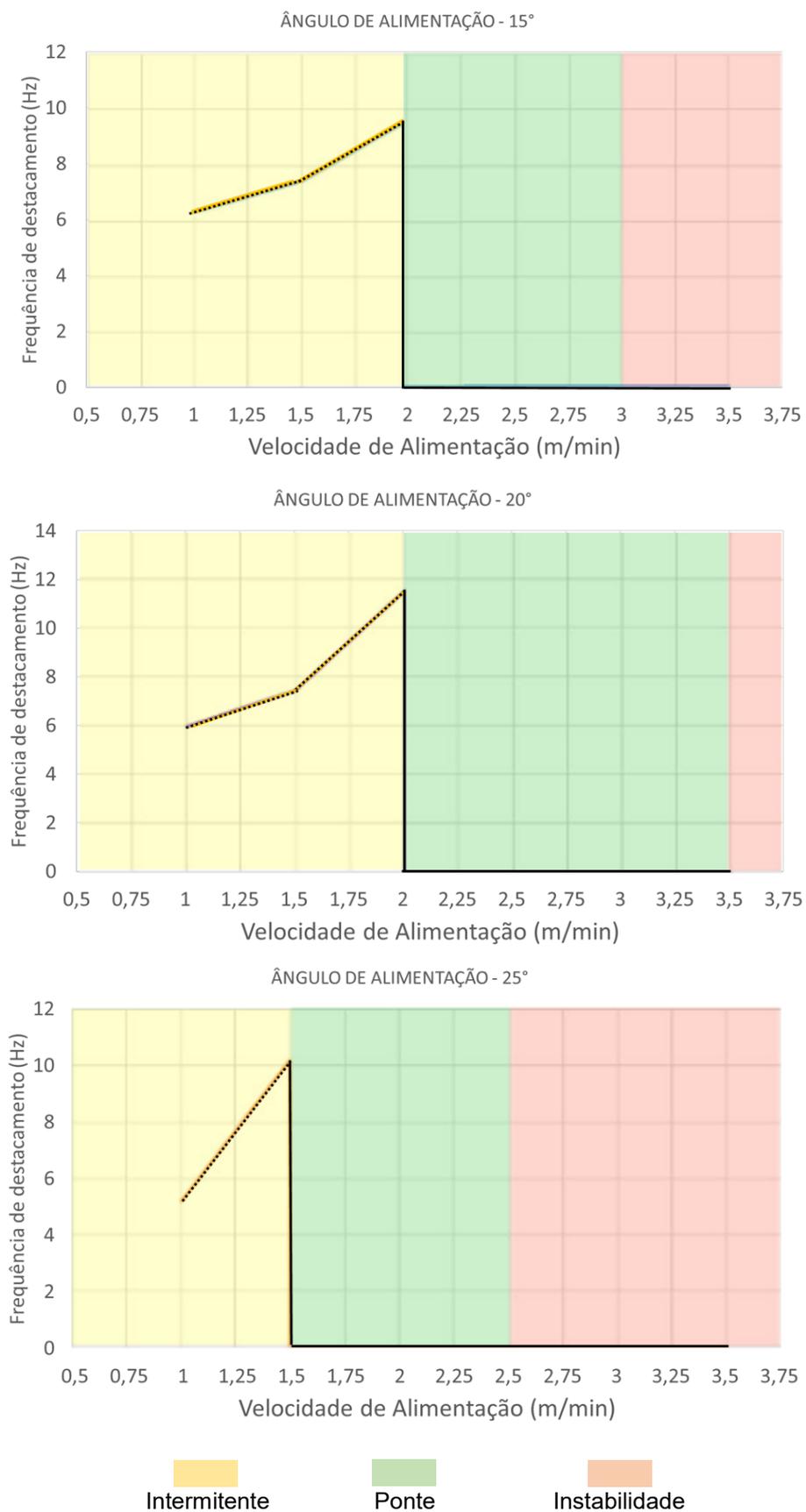
Deste modo, os resultados obtidos com os ângulos extremos de 10° e 30° foram descartados, pois, não apresentavam soldas com qualidade aceitável, ou seja, com a presença de defeitos e sem repetibilidade para a correta caracterização proposta da transferência metálica. No presente estudo, as melhores condições de estabilidade, considerando a eficiência da proteção gasosa e geometria dos cordões, foram alcançadas nas posições de inserção de arame entre 15°, 20° e 25°. A Figura 5.8 ilustra a aparência característica dos cordões de solda obtidos nas referidas posições de inserção de arame.

Figura 5.8 – Cordões fabricados sobre chapa para avaliação das características geométricas referente ao ângulo de inserção de arame. Corrente: 200 A, Vs: 015 m/min, Va inicial 1m/min



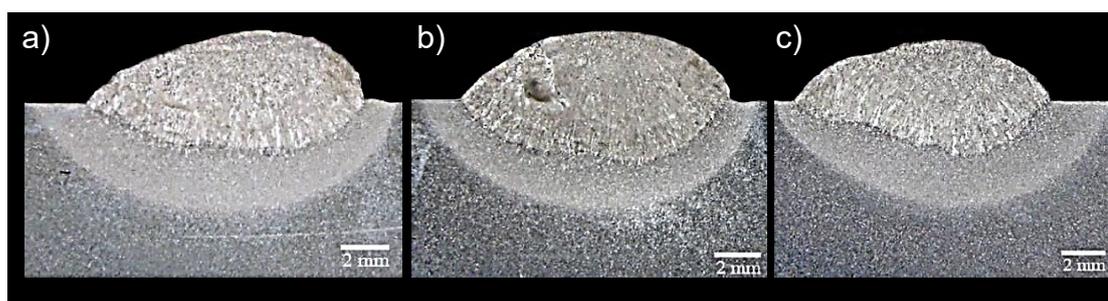
Os resultados dos ensaios, onde foram avaliados o comportamento da transferência metálica e a faixa de velocidades de alimentação sobre a qual cada tipo de transferência ocorria, estão mostrados nos gráficos da Figura 5.9. Nesse caso, a transferência metálica em ponte é almejada (área verde). O teste utilizando o ângulo de inserção em 20° foi o que permaneceu dentro de uma maior faixa de velocidade de arame, de forma estável e sem perturbações. Do mesmo modo verifica-se que no teste com ângulo de inserção em 25° foi alcançada uma região antecipada às demais, sobre a qual apresentou maior instabilidade (área vermelha).

Figura 5.9 – Limite operacional da transferência metálica utilizando o protótipo de ângulo variável



Ainda com a intenção de verificar influência dos ângulos na geometria dos cordões, a V_a constante de 2,5 m/min foi selecionada, por ser um parâmetro de melhor desempenho para as três condições e depósitos sobre chapa foram realizados. A Figura 5.10 expõe a seção transversal destes cordões.

Figura 5.10 – Macrografias dos cordões de solda obtidos com a utilização do protótipo. Ângulos de inserção do arame: a) 15° b) 20° e c) 25°



Apesar das variações do ângulo de inserção do arame, verifica-se, a partir de medições realizadas no *software* de tratamento de imagens *ImageJ* sobre as macrografias da Figura 5.10 que, para uma V_a de 2,5 m/min e corrente de 200 A, não foram obtidas diferenças consideradas significativas entre os cordões. A Tabela 2 apresenta as grandezas e os valores medidos nas referidas macrografias.

Tabela 2 – Dimensões médias dos cordões fabricados com o protótipo de ângulo de inserção variável

Ângulo	Área Penetração (mm ²)	Área Reforço (mm ²)	Diluição %
15°	19,2	27,8	40,7
20°	25,1	26,0	49,1
25°	20,5	25,6	44,4

De fato, considerando os dados obtidos no presente estudo, não fica evidente que o ângulo de 20° apresenta diferenças geométricas, as quais sejam representativas no processo em relação aos demais ângulos testados. No entanto, o ângulo de 20° proporcionou um aumento de aproximadamente 10% no valor da diluição em relação aos ângulos de 15° e 25° além de apresentar um perfil de penetração maior. É importante ressaltar, que o bocal de ângulo variável construído

não permitiu a realização dos estudos com os diferentes ângulos de forma mais completa como se planejou inicialmente, principalmente devido as limitações relatadas no início do presente item.

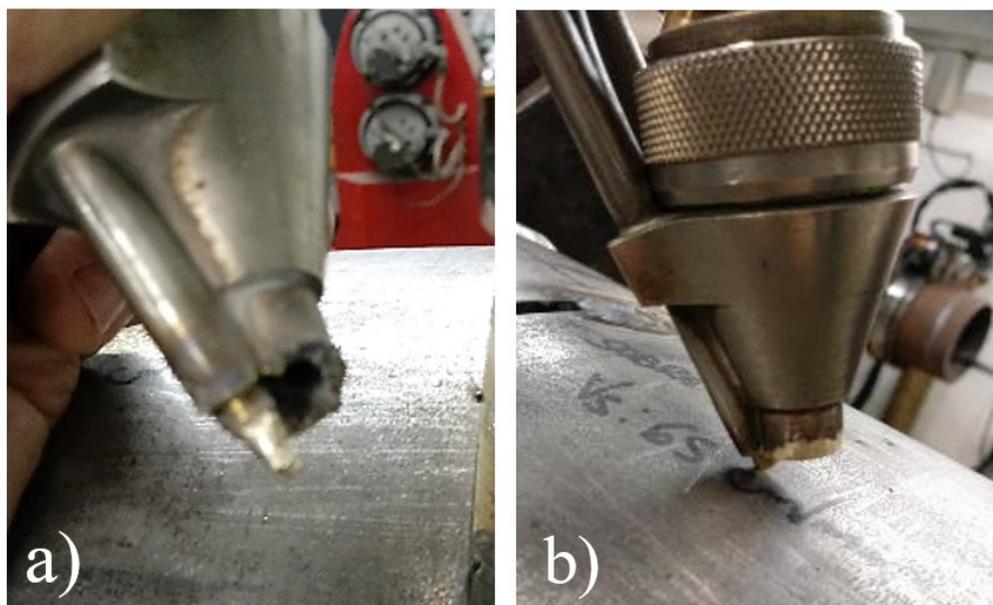
Pelo fato de ter permanecido em transferência metálica em ponte durante uma faixa maior que as demais condições testadas e pelos resultados listados Tabela 2, optou-se em utilizar o ângulo de 20° no projeto final do bocal. Além disso, a partir das informações de desempenho, obtidas nos testes com o protótipo, foi possível elencar os principais aspectos de melhoria, os quais foram implementados no projeto final do bocal. Dentre os principais aspectos considerados no projeto final, buscou-se:

- Melhorar o sistema de fixação do dispositivo, buscando a concentricidade entre o bocal e o eletrodo durante todo o processo;
- Garantir o direcionamento do arame, buscando manter sua posição constante durante o processo de soldagem;
- Garantir um menor comprimento do eletrodo para fora do bocal, buscando maior eficiência da proteção gasosa;
- Garantir o correto posicionamento e alinhamento entre o arame e o eletrodo;
- Utilizar um circuito de refrigeração independente para o bocal, para permitir o aumento da troca térmica, de modo a possibilitar a utilização de correntes de até 400 A e prospectando um aumento no fator de trabalho.

5.2.2 Fabricação e Montagem do Bocal TIG Compacto

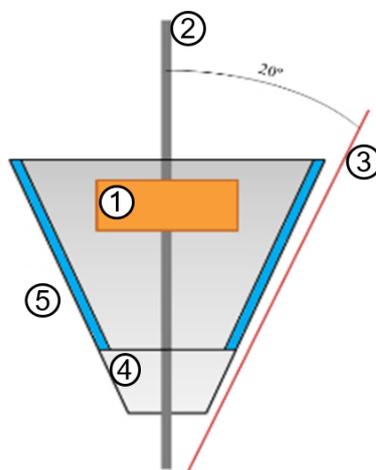
Durante os procedimentos de soldagem com o sistema comercial TopTIG, foi observado um desgaste acentuado na extremidade do bocal, próxima ao arco de soldagem, mostrado na Figura 5.11. Por esse motivo optou-se em utilizar uma montagem separada em três partes principais, utilizando peças consumíveis no novo bocal. Assim, se o algum componente sofresse uma avaria inerente do processo de soldagem, talvez não fosse necessário realizar a troca do bocal inteiro, como pode acontecer no bocal comercial.

Figura 5.11 – Desgaste do bocal TopTIG a) bocal desgastado b) bocal reparado



No caso ilustrado na Figura 5.11, foi possível reparar o equipamento. Mesmo assim, o bocal sofreu uma avaria que poderia comprometer o procedimento em aplicações futuras. Nesse contexto e, a partir dos resultados e melhorias sugeridas do protótipo, um modelo conceitual do bocal refrigerado com alimentação tangencial, foi estabelecido para guiar a etapa de projeto e modelagem dos componentes em *software* CAD, ilustrado na Figura 5.12. O arame será inserido em um ângulo de 20° em relação ao eletrodo, além da modificação do sistema de refrigeração e proteção gasosa.

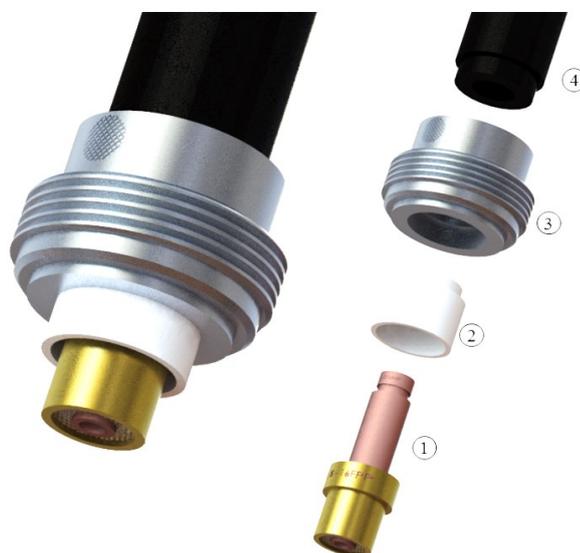
Figura 5.12 - Conceito construtivo do bocal desenvolvido. 1) Gas Lens; 2) Eletrodo de Tungstênio; 3) Material de Adição (Arame); 4) Bocal; 5) Canal de Refrigeração



Com o intuito de aumentar a robustez da fixação do bocal na tocha, o bocal compacto foi fixado com o auxílio do sistema *gas lens*, o qual suporta as demais peças do bocal no corpo da tocha, ilustrado na Figura 5.13. Utilizou-se como base de fixação uma tocha TIG automática, refrigerada a água e com capacidade de corrente de até 400 A, o que facilita a execução dos testes e a utilização dos consumíveis comerciais e sistemas auxiliares, como o sistema de refrigeração ou o sistema de proteção gasosa.

Figura 5.13 – Conjunto de fixação e proteção gasosa do bocal compacto através do sistema *gas lens*.

(1) *Gas lens*, (2) Bucha isolante, (3) Suporte fixador do bocal (4) Corpo da tocha



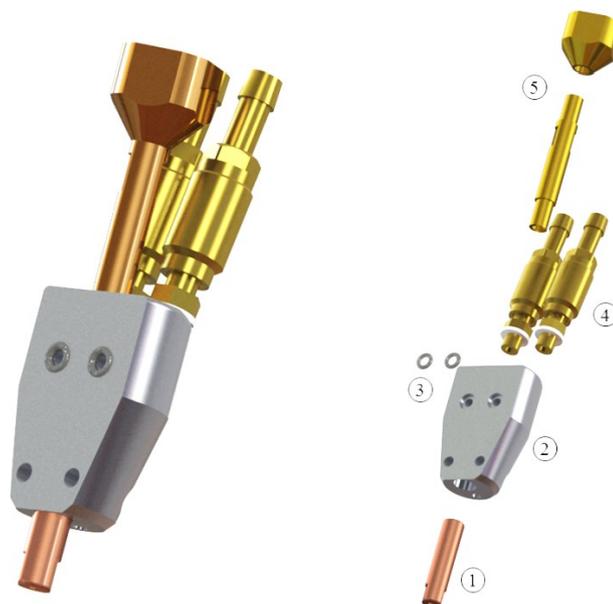
A utilização do próprio sistema *gas lens* como fixador, reduziu o risco de dano na rosca de fixação do corpo da tocha, como acontecia anteriormente no protótipo. A próxima etapa do processo de desenvolvimento do bocal foi vincular os canais de refrigeração, representados na Figura 5.14, propostos para aumentar a eficiência da troca térmica do componente, com o ângulo de inserção já definido. O modelo final, apresentou. Neste conjunto foram utilizados anéis de vedação compostos por elastômeros que suportam temperaturas de aproximadamente 300°C. Desta forma, elimina-se a necessidade do emprego de brasagem nos componentes, processo que tornaria o bocal um componente único, sem a possibilidade de substituição de peças.

Figura 5.14 - Projeto do bocal, com destaque para o canal de refrigeração. 1) Peça externa; 2) Anéis de vedação; 3) Peça interna



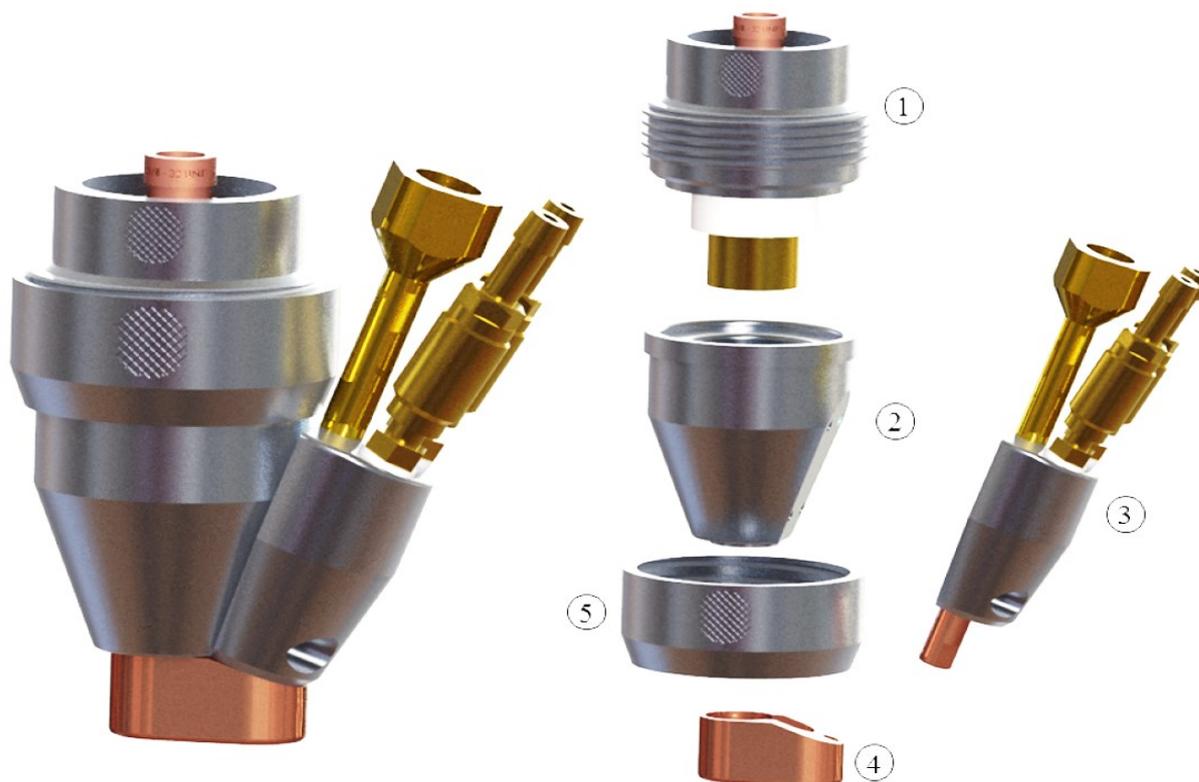
Para a utilização de fluido refrigerante, o bocal deve viabilizar a conexão de mangueiras para sua refrigeração, além de suportar e direcionar de forma fixa e rígida o material de adição. Buscando a redução das dimensões do projeto, o direcionador lateral do arame e os canais de circulação do fluido, eram compostos por um único conjunto. Visando melhorar o direcionamento do arame e tornar simples o projeto, aproveitando componentes comerciais, um bico de contato de tochas MIG/MAG foi utilizado para o direcionamento do arame na poça de fusão e alinhamento com o eletrodo de tungstênio. Assim como no MIG/MAG, o bico deve obedecer ao diâmetro do arame utilizado.

Figura 5.15 Conjunto de direcionamento do arame e refrigeração do bocal



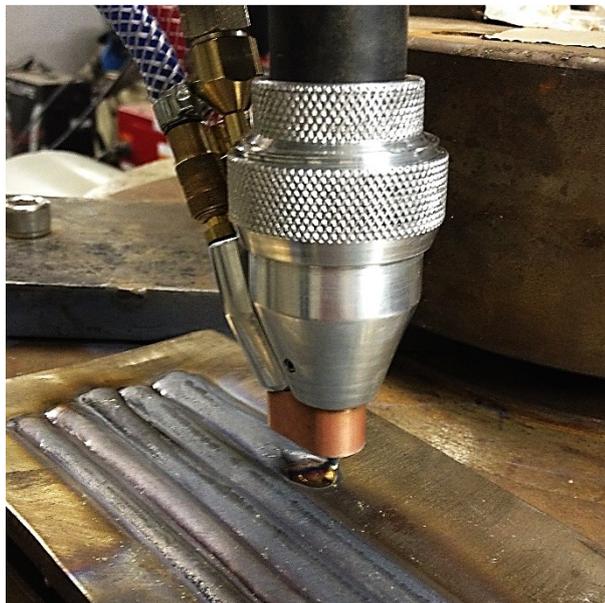
Diante do problema observado, ilustrado na Figura 5.11, ilustrando um desgaste severo no bocal comercial, optou-se em desenvolver um componente o qual fosse intercambiável, tornando-se desta forma um item consumível e podendo ser substituído quando necessário sem comprometer o restante do bocal. A exposição do bico ao calor gerado no arco é grande. Desse modo, o componente foi fabricado em cobre devido à boa capacidade de troca de calor com o meio, apresentando condutividade térmica de $401 \text{ W/ m}\cdot\text{K}$. Um panorama geral dos elementos que compõem o bocal é ilustrado na Figura 5.16.

Figura 5.16 – Representação da montagem completa do bocal. 1) Sistema de fixação; 2) Bocal; 3) Direcionador Lateral; 4) Inserto intercambiável; 5) Porca de fixação.



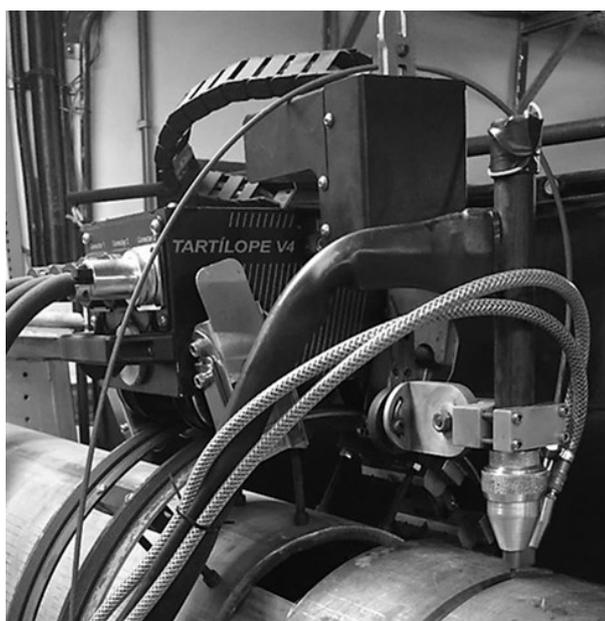
Após a montagem do bocal desenvolvido, o dispositivo foi submetido a testes de estanqueidade. Os testes foram realizados primeiramente sem a presença do arco, utilizando uma unidade de refrigeração de tocha de soldagem. No teste o dispositivo não apresentou vazamentos de água. Logo após, o bocal foi submetido ao mesmo teste, porém, com a presença do arco. Dessa forma foi possível avaliar a estanqueidade do bocal quando aquecido, para saber se os anéis de vedação iriam suportar o calor gerado no processo. Tanto a estanqueidade quanto uma eficaz refrigeração do bocal foram atingidas. Na Figura 5.17, é possível verificar o bocal já em sua montagem final, durante os testes de estanqueidade na soldagem sobre chapa.

Figura 5.17 – Bocal refrigerado com alimentação tangencial sendo submetido aos testes de estanqueidade e refrigeração na soldagem plana



Além disso, o bocal apresentou boa rigidez dos componentes e fácil instalação no Tartilope V4. Na Figura 5.18 é ilustrado o bocal já montado e instalado no manipulador, compondo a bancada de testes de soldagem TIG orbital.

Figura 5.18 - Bancada montada com o Tartilope V4 e bocal compacto de ângulo reduzido para soldagem orbital



5.3 SOLDAGEM TIG ORBITAL

5.3.1 Soldagem do Passe de Raiz

Na soldagem do passe de raiz foram utilizadas duas abordagens, por meio de dois modos operacionais, *keyhole* e *melt-in*. Nos parágrafos seguintes estão relatados os principais resultados e conclusões obtidos a partir da experiência de utilização dessas duas metodologias.

No modo *keyhole* o arco deve atravessar o material de base, formando um furo passante na junta, o qual é fechado com auxílio da solidificação do material de adição alimentado por trás do arco, conforme a tocha de soldagem é movimentada. Por outro lado, no modo *melt-in*, a combinação entre a corrente e a velocidade de soldagem deve ser regulada de modo que a própria poça de fusão seja capaz de alcançar a raiz da junta e fundi-la sem a presença do defeito de falta de penetração. A Figura 5.19 ilustra a formação da raiz através da soldagem no modo *melt-in*.

Figura 5.19 – Formação da poça de fusão no interior do tubo de aço inoxidável no modo *melt-in*



Durante a soldagem do passe de raiz nos tubos de aço inoxidável, o maior desafio era contornar os efeitos da variação da poça de fusão dentro do chanfro, principalmente em virtude da variação da posição de soldagem ao longo da junta e sobretudo das forças atuantes no processo. Tais variações impactaram diretamente

na estabilidade do *keyhole* (Figura 5.20), o que pode causar alterações geométricas da poça de fusão e conseqüentemente do cordão de solda.

Figura 5.20 – Representação do *keyhole* durante a abertura do arco na soldagem do passe de raiz



Além disso, uma vez formado o *keyhole*, era extremamente importante mantê-lo de maneira estável e controlado, ou seja, com energia suficiente para que o furo passante não se fechasse acarretando em falta de penetração ou, de maneira mais catastrófica, que o buraco abrisse demasiado, ocasionando um rasgo na junta. Nos testes realizados em soldagem TIG orbital com alimentação tangencial, o início do procedimento (abertura do *keyhole* e formação da poça) apresentou extrema dificuldade em manter-se estável. Durante os testes, ficou evidente a sensibilidade do processo, no modo *keyhole*, principalmente em relação a variação geométrica da junta, como *high-low* ou aberturas excessivas. A Figura 5.21 evidencia um dos principais problemas enfrentados durante esta etapa.

Após a abertura do arco, tanto no modo *keyhole* quanto no modo *melt-in*, caso a energia fosse elevada a perfuração da junta era inevitável e descontrolada, pois uma vez perfurada, não era possível recuperar a continuidade da solda. Apesar das características citadas, as variações geométricas ao longo da junta não afetam de forma tão significativa no modo *melt-in*, visto que, neste modo de operação, no presente trabalho, foram utilizadas velocidades de soldagem bem inferiores ao modo *keyhole*. Assim, a possibilidade de se perder a continuidade da solda também diminui.

Figura 5.21 – Rasgo formado na junta soldada no modo *keyhole*

5.3.1.1 Passe de raiz com alimentação tangencial de arame

Após a realização de ensaios preliminares com movimentação linear, os quais não proporcionaram bons resultados, optou-se em utilizar trajetórias do tipo oscilatória na ponta da ferramenta (tecimento) programados com amplitude de 4 mm, tendo em vista absorção de pequenas imperfeições da junta pelo arco. Os demais parâmetros iniciais utilizados no primeiro teste de soldagem orbital, são listados na Tabela 3 .

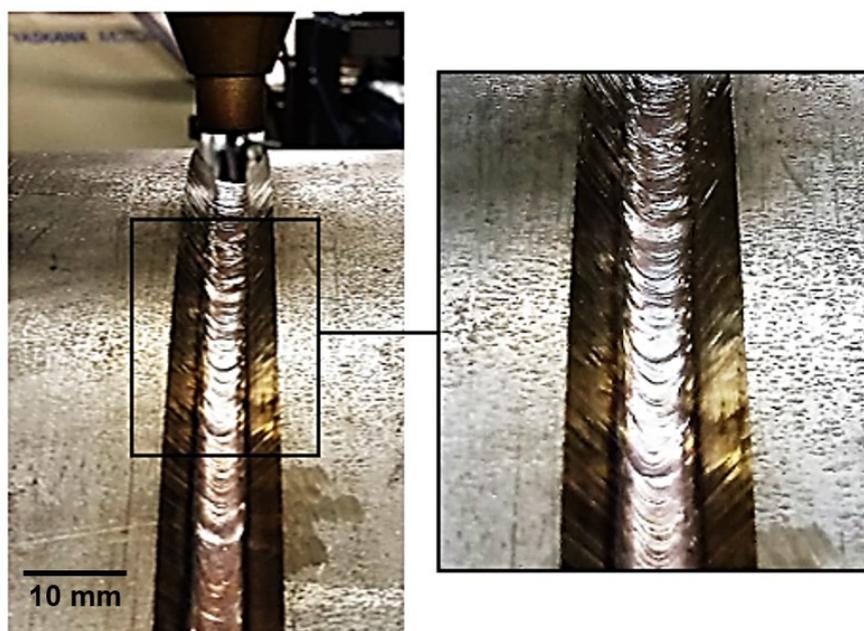
Tabela 3 – Parametrização inicial para a soldagem do passe de raiz utilizando o sistema comercial.

(P) Plana; (V) Vertical; (SC) Sobre cabeça

Parâmetros de Soldagem					
Posição		Corrente Pulso/Base	Frequência	V.A	V.S
P	0° - 20°	220 A	-	2,5 m/min	0,2 m/min
V	20° - 160°				
SC	160° - 180°				
Parâmetros de Movimentação					
Amplitude		Progressão	Parada nas extremidades	Frequência	
4 mm		Descendente	0,3 s	2 Hz	

Na soldagem do passe de raiz com os parâmetros da Tabela 3, foi constatado que a corrente de soldagem utilizada, era insuficiente para realizar a soldagem orbital do passe de raiz em todas as posições do tubo, com face de raiz de 2 mm. Mesmo atuando na potência máxima da fonte de soldagem *Air Liquide*, não houve penetração total em nenhum dos trechos dos 180° do tubo. Por meio das verificações realizadas durante a execução do procedimento, foi possível perceber que a poça de fusão apresentava severa instabilidade. Neste teste, ficou evidente o fato de que a agitação da poça ocorria sobretudo devido aos parâmetros dinâmicos do processo, ou seja, à uma combinação inapropriada entre o tecimento e a velocidade de soldagem, auxiliada pela variação do comprimento do arco. De tal modo, a instabilidade da poça acarretou em um aspecto superficial do cordão não uniforme, conforme ilustrado na Figura 5.22, porém, acredita-se que este fato não foi o principal responsável pela falta de penetração na raiz, a qual se deve principalmente pela baixa corrente empregada.

Figura 5.22 – Aspecto superficial do cordão de solda do passe de raiz com os parâmetros iniciais da Tabela 3



Neste caso, é natural optar simplesmente pelo aumento da corrente de soldagem. No entanto, o processo TIG apresenta uma tendência crescente para a formação de defeitos de falta de continuidade do cordão conforme a corrente de soldagem é aumentada (SCHWEDERSKY, 2015). Assim perfura-se a junta, sem

recuperação da continuidade do cordão, como foi ilustrado na Figura 5.21, gerando também, defeitos como o *burntrough* ou também denominado como *melt trough*, conforme Cho et al.. No presente trabalho, foi observado que a perfuração da junta, acontecia geralmente após a passagem de uma determinada posição de soldagem para outra, como da plana para a vertical, por exemplo. A Figura 5.23 ilustra o defeito diretamente na junta soldada.

Figura 5.23 – Exemplos de perfurações (*melt through*) ocorridas durante a soldagem TIG orbital



Este fenômeno, considerado um defeito em soldagem, pode ser considerado similar ao defeito *humping*, quando se utiliza elevados patamares de corrente e velocidade de soldagem concatenados. O *humping* é caracterizado por uma região formada por protuberâncias e vales no cordão de solda. A forte tendência de formação do *humping* utilizando argônio puro como gás de proteção existe mesmo utilizando velocidade de soldagem baixa, de 0,3 m/min. Além disso, a formação do defeito acontece também pelo fato de que maiores correntes de soldagem geram elevada pressão exercida pelo arco sobre a poça (SCHWEDERSKY, DUTRA e SILVA, 2011).

Após a constatação de que os parâmetros da Tabela 3 não atingiriam um resultado satisfatório na soldagem do passe de raiz, principalmente devido à necessidade do aumento do valor da corrente, optou-se pela utilização de uma fonte com maior capacidade de fornecer corrente, visto que a velocidade de soldagem já era relativamente baixa (0,2 m/min). Desse modo, a fonte Digitec 600 da IMC-Soldagem foi utilizada, porém, ainda equipada com a tocha comercial.

Após a adoção de movimentação linear, os procedimentos realizados com corrente constante apresentaram significativa estabilidade da poça dentro do chanfro e evolução na obtenção de penetração total na junta. Além disso, os cordões apresentaram aspecto superficial ligeiramente melhorado (Figura 5.24) em relação ao procedimento com o tecimento.

Considerando estudos preliminares em soldagem TIG orbital, conduzidos no LABSOLDA por Pigozzo (2015) e Paes (2016), após a substituição da fonte de soldagem decidiu-se iniciar os novos testes partindo de 300 A de corrente e conseqüentemente, aumentando a velocidade de soldagem de forma gradual a fim de obter maior produtividade na fabricação da raiz. Porém, o procedimento ainda apresentava muita dificuldade para alcançar a penetração total. Apesar das dificuldades encontradas ao longo do estudo, resultados considerados satisfatórios, foram atingidos com a corrente de 360 A. Os parâmetros de soldagem utilizados na soldagem do passe de raiz com corrente constante no modo *keyhole* são listados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parametrização da soldagem orbital com corrente constante

Parâmetros de Soldagem					
Posição		Corrente Pulso/Base	Frequência	V.A	V.S
P	0° - 20°	360 A	-	4 m/min	0,5 m/min
V	20° - 160°				
SC	160° - 180°				
Parâmetros de Movimentação do Robô					
Amplitude		Progressão		Parada nas Extremidades	Frequência
0 mm		Descendente		-	-

A partir de uma avaliação visual da face externa da raiz não foram identificados defeitos superficiais como mordeduras ou descontinuidades do cordão, bem como, foi

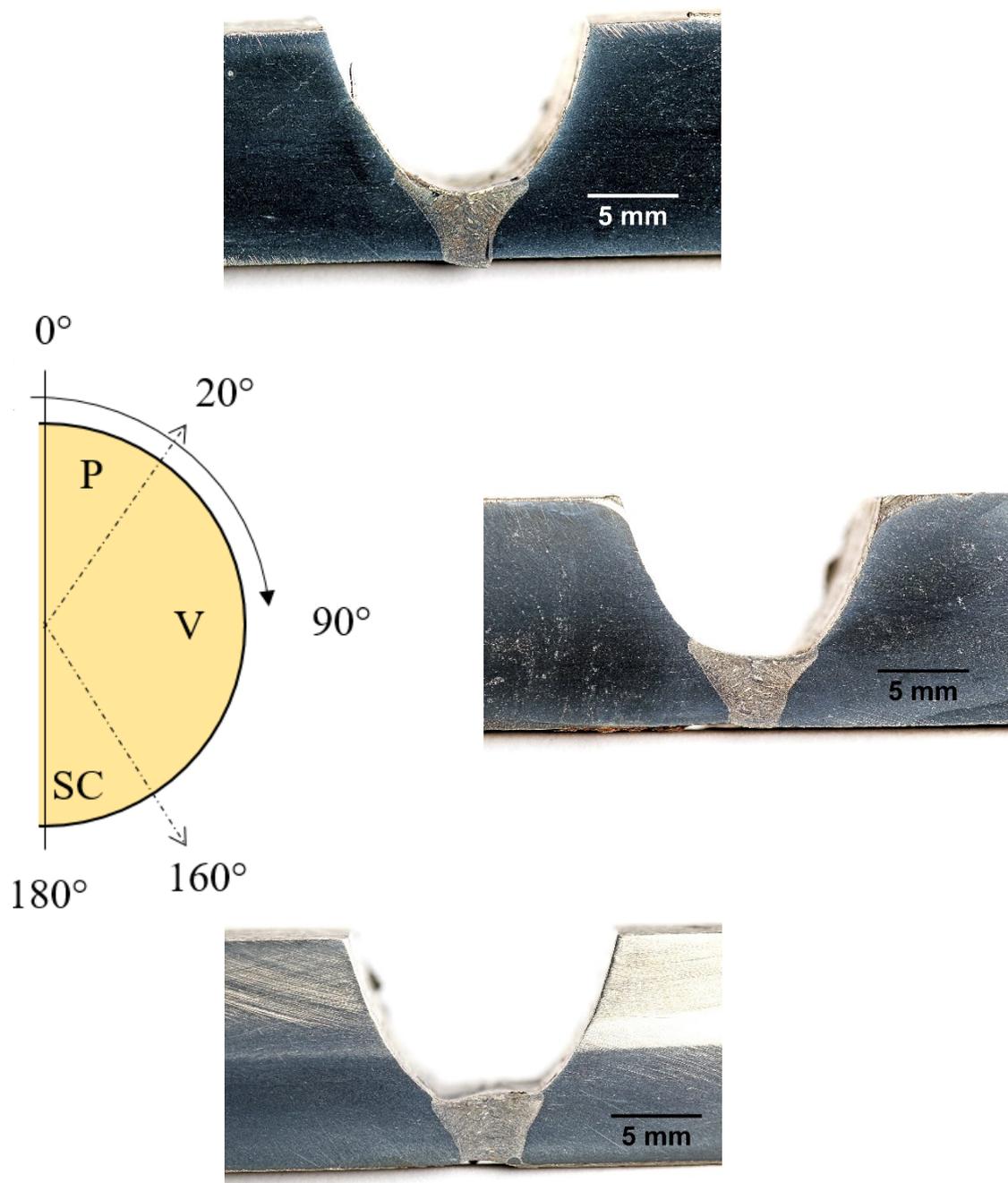
observado uma melhora significativa no acabamento. A Figura 5.24 evidencia o resultado da solda obtido com a parametrização da Tabela 4.

Figura 5.24 – Aspecto superficial superior e inferior do passe de raiz realizado com corrente constante no equipamento comercial



Em relação à face interna, o procedimento conferiu penetração total. Contudo, na região da posição sobre cabeça o perfil de penetração apresentou uma leve concavidade no material fundido que pode ser verificada com auxílio das macrografias apresentadas na Figura 5.25.

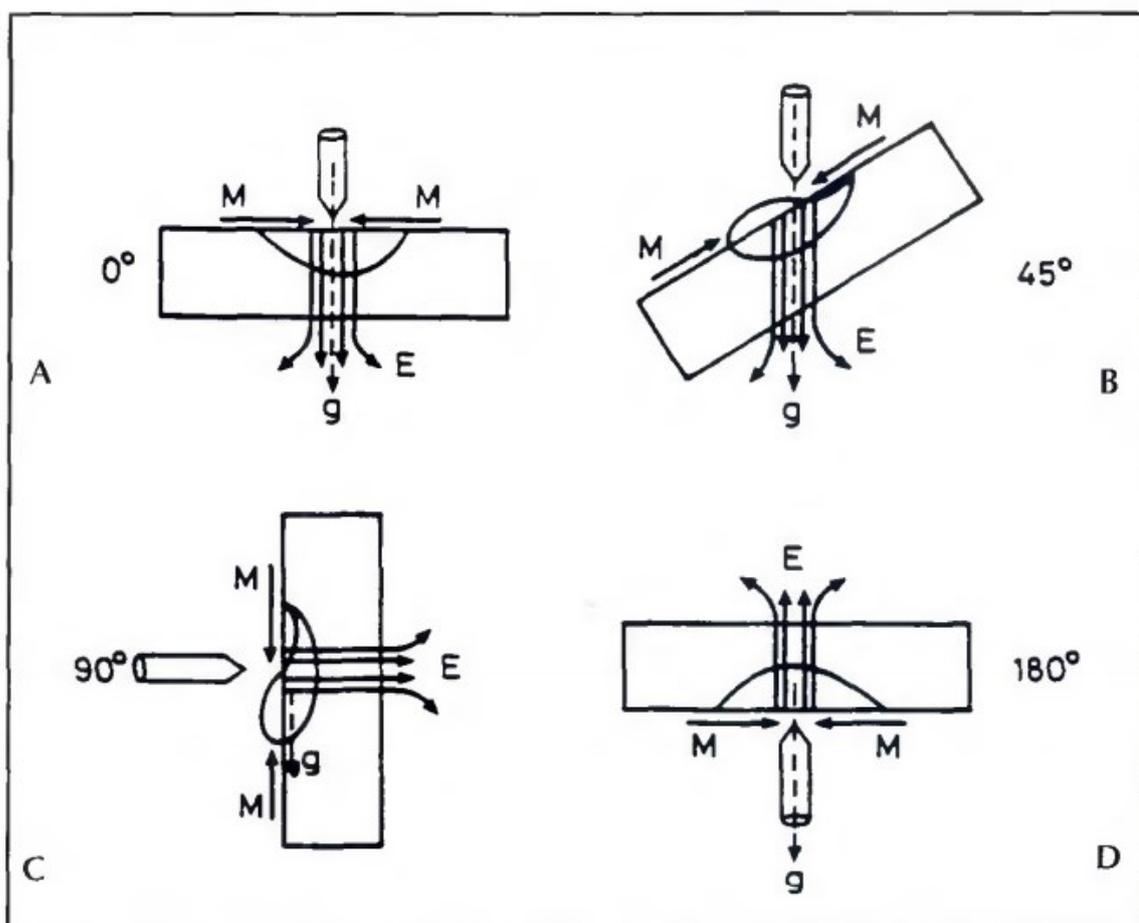
Figura 5.25 – Macrografias do passe de raiz realizado com corrente constante no equipamento comercial de alimentação tangencial (TopTIG)



É possível perceber que no procedimento orbital, o perfil geométrico da área fundida se modifica de forma moderada, conforme a variação da posição de soldagem. Tal característica advém principalmente da influência da força gravitacional no comportamento da poça de fusão. Esta ocorrência é discutida e corroborada no trabalho realizado por Schirali e Mills (1993), cujos autores argumentam que a poça

de fusão está sujeita não somente à força gravitacional como também sob efeito de forças eletromagnéticas (Força de Lorentz), forças de flutuabilidade (*buoyancy*) e principalmente, forças oriundas do efeito Marangoni. Este último efeito, é caracterizado pela movimentação de massa provocado por um gradiente de tensão superficial, sendo também denominado pelos autores como forças termocapilares e que estas forças se alteram conforme a posição da peça em relação à horizontal (SHIRALI e MILLS, 1993). A Figura 5.26, exposta no trabalho, ilustra a atuação das forças na poça de fusão durante o processo de soldagem TIG em diferentes posições de soldagem, em relação a um plano horizontal.

Figura 5.26 - Desenho esquemático mostrando o efeito da posição da peça (em relação à horizontal) no perfil da solda evidenciando os efeitos das forças: eletromagnéticas (E) efeito Marangoni (termocapilar) (M) e a força gravitacional (g).



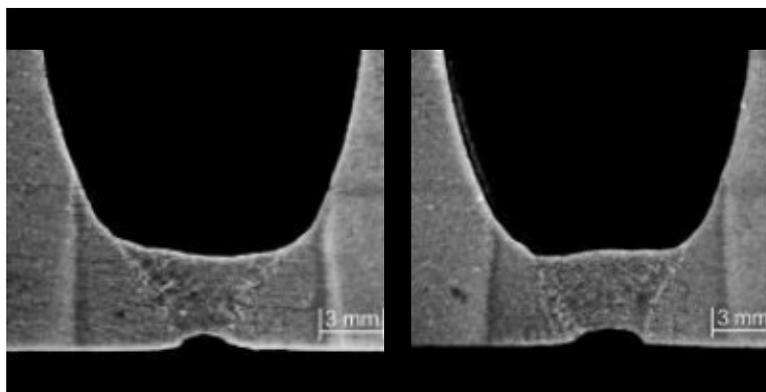
Fonte: (SHIRALI e MILLS, 1993)

Nas macrografias apresentadas na Figura 5.25 nota-se que a área fundida na posição plana possui um perfil de penetração moderadamente diferente da posição

sobre cabeça, apresentando um reforço de raiz um pouco maior que nesta última. Conforme a representação das forças envolvidas no processo, ilustradas na Figura 5.26, é possível inferir que a penetração na região da posição plana é influenciada, principalmente pela atuação da força eletromagnética e gravitacional. Em contrapartida, na região da posição sobre cabeça, entre 160° e 180°, é possível notar a presença de concavidade no metal fundido da raiz. Nesta condição a força gravitacional parece ser mais pronunciada do que as demais, proporcionando um cordão com um maior reforço e leve concavidade.

Paes (2016), ao estudar a soldagem TIG orbital em tubos de aço carbono assistido pela técnica de alimentação dinâmica de arame, atingiu resultados muito similares nesta região do tubo, porém, no trabalho foi apresentado concavidade considerada excessiva, não aceita por normas adotadas pelo autor, como a ISO 5817 Nível B, conforme ilustrado na Figura 5.27. Esta norma estipula que a concavidade da raiz não deve ultrapassar 0,5 mm.

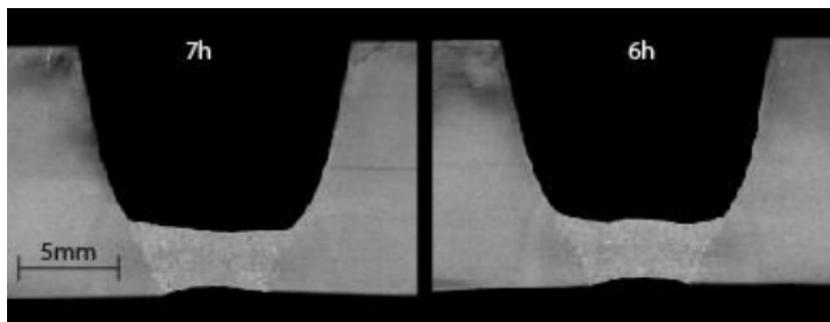
Figura 5.27 – Macrografias do passe de raiz na região sobre cabeça apresentadas por Paes, evidenciando a mesma presença de concavidade



Fonte: (PAES, 2016)

De maneira análoga, resultados semelhantes na soldagem TIG orbital no que se refere a presença de concavidade nesta região da junta foram encontrados conforme ilustrado na Figura 5.28. No trabalho o autor justifica que a redução da velocidade de soldagem na região da posição sobre cabeça, reduziu a incidência de concavidade na raiz de maneira bastante considerável (PIGOZZO, 2015).

Figura 5.28 - Macrografias do passe de raiz na região sobre cabeça (6h e 7h) apresentadas por Pigozzo evidenciando a presença de concavidade



Fonte: (PIGOZZO, 2015)

Na Figura 5.29, a concavidade da raiz revelada na posição sobre cabeça do presente trabalho, pode ser melhor avaliada. Conforme discutido, a presença de concavidade na região da posição sobre cabeça é um fato recorrente na soldagem orbital, inclusive com a utilização de diferentes processos de soldagem como o MIG/MAG (SARTORI, 2016).

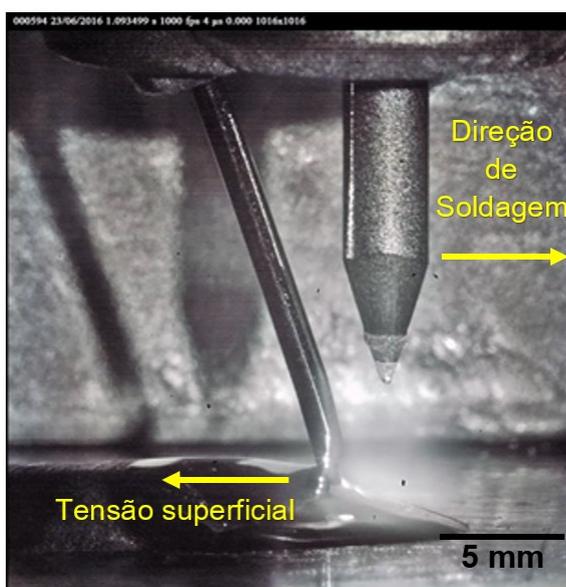
Figura 5.29 – Macrografia da junta soldada na região sobre cabeça evidenciando a concavidade da raiz



No presente estudo, a transferência metálica na soldagem do passe de raiz e de preenchimento ocorreu no modo não interrompido (ponte). A alimentação de arame aconteceu por trás do arco, o que contribuiu para não contaminação do eletrodo

de tungstênio. Apesar da característica multidirecional, referente à direção da injeção de arame do equipamento comercial (TopTIG) e discutida anteriormente, o fabricante recomenda, quando possível, a inserção do arame por trás do arco em relação à direção de soldagem. Assim, através da análise do procedimento durante a soldagem das juntas, foi possível verificar que a ponte formada entre o arame fundido e a poça de fusão, parece estar sujeita a uma componente de força no sentido contrário à direção de soldagem. Esta força é proveniente sobretudo da tensão superficial existente na poça de fusão que, por sua vez, “puxa” a ponte metálica no sentido contrário ao deslocamento da tocha, conseqüentemente, no sentido contrário ao deslocamento do eletrodo, ilustrado na Figura 5.30. Por esse motivo acredita-se que a contaminação do eletrodo de tungstênio, no presente estudo, foi atenuada. Neste caso, ressalta-se a importância da adequada regulação da velocidade de soldagem.

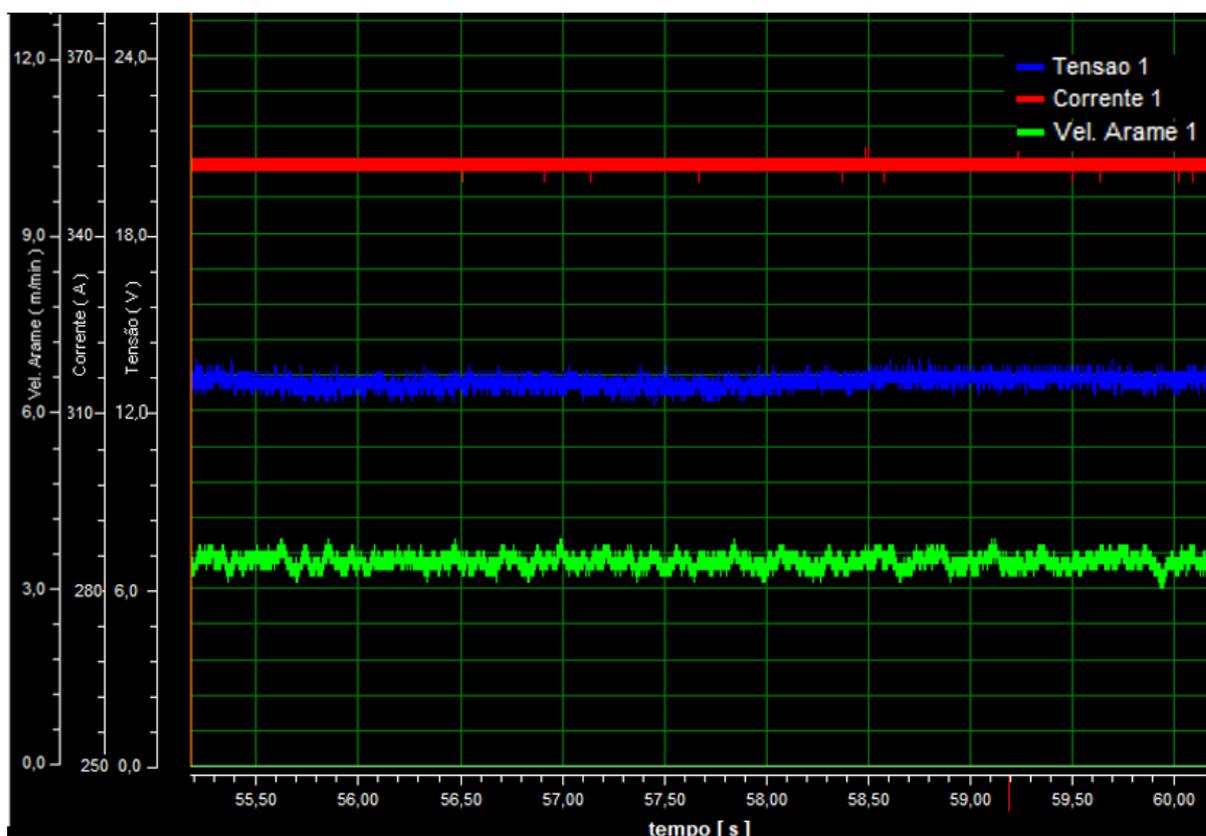
Figura 5.30 – Soldagem sobre chapa ilustrando a contribuição da força por tensão superficial na poça de fusão puxando a ponte metálica no sentido contrário ao deslocamento da tocha



Além disso, pelo fato da velocidade de alimentação de arame regulada na soldagem do passe de raiz ser relativamente alta, foi possível garantir a transferência metálica em ponte com o comprimento do arco de aproximadamente 3 mm. O oscilograma apresentado na Figura 5.31 evidencia um trecho de cinco segundos de aquisição dos sinais elétricos obtidos durante o procedimento orbital do passe de raiz, onde fica evidente, pela continuidade do sinal de tensão em azul, que a transferência metálica ocorreu exclusivamente por ponte. Caso contrário, quando ocorrem os

destacamentos em uma transferência intermitente, uma perturbação no sinal é ocasionada, provocando pequenas variações na tensão do arco.

Figura 5.31 – Oscilograma dos sinais elétricos obtidos durante a soldagem do passe de raiz no procedimento TIG orbital



Um dado importante, relacionado à produtividade do processo, é a velocidade de alimentação de arame atingida no presente estudo com o emprego da técnica de alimentação tangencial no processo TIG orbital. O oscilograma da Figura 5.31, evidencia a velocidade de alimentação de arame média utilizada no processo, aproximadamente 4m/min, com arame de 1 mm de diâmetro na soldagem do passe de raiz. No TIG pulsado aplicado à soldagem orbital, Paes (2016) utilizou velocidade de alimentação de arame máxima de 1,5 m/min com corrente média de 311 A (469 no pulso e 153 na base) e Pigozzo (2015) atingiu 1,2 m/min de V_a para uma corrente média de 145 A (180 A no pulso e 110 A na base). O resultado da V_a obtida no presente trabalho, alcançando um procedimento estável, sugere que a alimentação tangencial, de fato, proporciona um aumento na taxa de alimentação de arame no processo TIG.

Outrossim, o procedimento da soldagem do passe de raiz com alimentação tangencial, foi executado com corrente pulsada, alcançando resultados muito

similares no que se refere às características do cordão de solda e espessura da raiz, em relação aos testes realizados com corrente constante. Entretanto, para que o processo com corrente pulsada atingisse robustez, foi necessário estudar os parâmetros de pulsação de modo que a parametrização não originasse defeitos na junta, principalmente perfuração.

Lothongkum et al. (1999), avaliaram os parâmetros de soldagem do TIG pulsado em chapa de aço inoxidável 304L de 3 mm de espessura nas posições plana, vertical e sobre cabeça. Tais condições de soldagem, apresentam similaridade com as condições do presente estudo, ponderando que a espessura da face da raiz (nariz) utilizada nos tubos, foi de 2 mm. Assim sendo, no trabalho o autor recomenda que as correntes de pulso devem ser aumentadas conforme o aumento da velocidade de soldagem. O que é defendido por ele é que, deste modo, evita-se variações nas propriedades mecânicas na junta soldada, ocasionada por um período muito grande entre os pulsos. Além disso, o que também foi ponderado nesta etapa do trabalho, referente ao uso da corrente pulsada no TIG, foi a diminuição da ocorrência de falta de penetração nas juntas soldadas, o que foi exposto em algumas juntas com corrente constante. Assim, optou-se pelo emprego de um pulso de corrente de 400 A, mesmo considerando o risco iminente de perfuração da junta.

No presente trabalho, durante os testes com corrente constante, inúmeras juntas apresentaram falta de penetração ou perfurações em regiões variadas. A corrente de pulso de 400 A, a uma frequência de 5Hz, foi utilizada com o intuito de mitigar o defeito de falta de penetração, bem como, a corrente de base de 320 A utilizada para diminuir a ocorrência de perfuração. Todos os demais parâmetros utilizados com corrente pulsada na soldagem orbital, estão listados na Tabela 5.

Tabela 5 - Parametrização da soldagem orbital com corrente pulsada utilizadas no sistema comercial

Parâmetros de Soldagem					
Posição		Corrente Pulso/Base	Frequência	V.A	V.S
P	0° - 20°	400/320 A	5 Hz	4 m/min	0,5 m/min
V	20° - 160°				
SC	160° - 180°				
Parâmetros de Movimentação do Robô					
Amplitude		Progressão		Parada nas Extremidades	Frequência
0 mm		Descendente		-	-

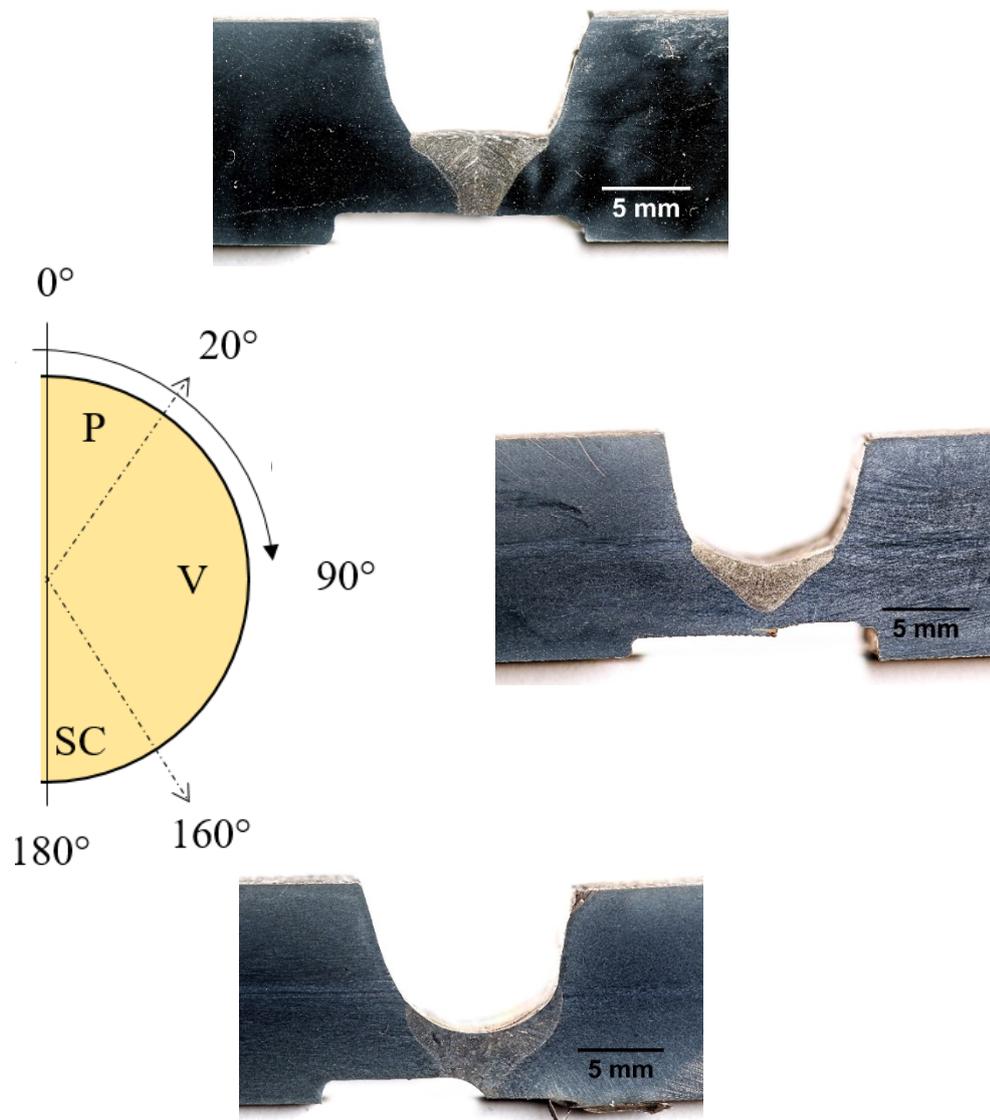
O patamar de corrente média usado neste procedimento foi capaz de alcançar a raiz da junta garantindo a penetração total. Nos testes com corrente pulsada, manteve-se a mesma corrente média utilizada nos testes com corrente constante, de 360 A. O aspecto superficial da junta soldada do passe de raiz com corrente pulsada está ilustrado na Figura 5.32. A secção transversal deste cordão poderá ser visualizada no item que trata sobre o preenchimento completo da junta.

Figura 5.32 – Aspecto superficial da face e da raiz realizada com corrente pulsada no equipamento comercial



Após a soldagem do passe de raiz utilizando o sistema comercial TopTIG, o procedimento foi testado, desta vez, utilizando a segunda bancada equipada com bocal desenvolvido no LABSOLDA e o Tartilope V4, ilustrada anteriormente na Figura 5.18. O procedimento foi realizado com corrente constante e demais parâmetros, listados na Tabela 4, de modo a avaliar o desempenho do equipamento desenvolvido em relação aos resultados atingidos com o equipamento comercial. Nesta etapa, quando se buscou avaliar a repetibilidade dos parâmetros, foi constatado que a não uniformidade da espessura do nariz (variação medida entre 1 e 3 mm) pudesse estar contribuindo para a ocorrência dos defeitos de falta de fusão ou perfuração da junta, que foram observados nos ensaios anteriores. Assim, o processo de fabricação das juntas teve que ser modificado. A fim de garantir repetibilidade nas dimensões das juntas após o processo de usinagem, visto que a chanfradeira de tubos não estava garantindo a qualidade suficiente de fabricação, optou-se em realizar o processo de torneamento interno dos tubos, de modo a minimizar os efeitos da ovalização. Com isso, foi possível garantir a espessura do nariz constante em 2mm, dimensão considerada prioritária a ser conservada nos testes. Mesmo assim, apesar da melhoria realizada na fabricação dos chanfros, em algumas regiões do tubo, a junta apresentou desalinhamentos acentuados entre os dois anéis (*high-low*). Nas macrografias ilustradas na Figura 5.33, já é possível verificar a mudança realizada na geometria da junta, devido à usinagem interna do tubo, bem como a visualização do *high-low* presente nas posições vertical e sobre cabeça.

Figura 5.33 - Macrografias do passe de raiz realizada com corrente constante no bocal desenvolvido



As macrografias confirmam que o procedimento atingiu resultados muito similares com os mesmos parâmetros utilizados no sistema comercial. Ainda assim, algumas juntas, apresentaram falta de penetração na posição vertical. Desta maneira, a maior parte do material fundido não permanece logo abaixo do arco, o que por sua vez torna o procedimento relativamente mais sensível aos defeitos citados (CHO, *et al.*, 2013). Ao contrário da situação relatada, isto não acontece na progressão descendente, adotada no presente estudo. Pois, neste caso, o que foi constatado durante o procedimento, é que a poça aumenta de tamanho devido ao escorrimento, permanecendo imediatamente abaixo do arco, formando uma espécie de barreira para o arco penetrar até a raiz da junta. Em alguns casos, esse fato pode ter contribuído

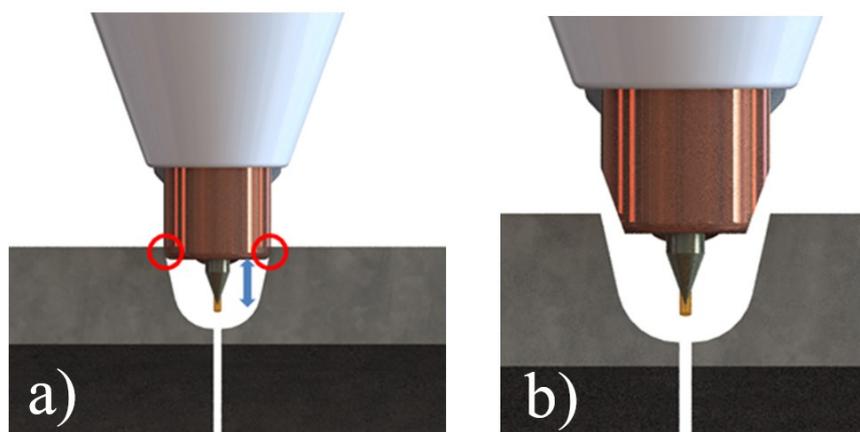
para a falta de penetração nesta região da junta, ilustrada na Figura 5.33 . No entanto, é importante ressaltar que o defeito não ocorreu em todos os ensaios.

5.3.2 Soldagem de Preenchimento

Considerando os desafios encontrados na soldagem do passe de raiz, utilizando o processo TIG orbital com alimentação tangencial, existe uma tendência que os passes de preenchimento apresentem menor dificuldade em sua fabricação, pois a espessura do material de base, após o passe de raiz, aumenta, tornando assim uma condição mais favorável para que a junta não seja perfurada e contribuindo para acomodação da poça de fusão dentro do chanfro, por exemplo.

O perfil do chanfro utilizado visa aumentar a produtividade, reduzindo a área a ser preenchida, conseqüentemente, reduzindo a quantidade de material e o tempo necessário para o preenchimento da junta. Entretanto, o que pôde ser observado durante os testes de preenchimento, foi a interferência da geometria do chanfro “U” com o bocal da tocha com alimentação tangencial. Este formato, limita os movimentos laterais da tocha, sobretudo em tubos com paredes espessas quando comparados com o chanfro em forma de V, utilizado em procedimentos manuais. Esta característica geométrica contribui para soldas com defeitos de falta de fusão. Nesse sentido, foi necessário adaptar as dimensões do bico intercambiável do bocal para que se conseguisse abrir o arco TIG por toque na junta utilizada e para facilitar a oscilação da tocha. A Figura 5.34 ilustra a alteração realizada no bocal.

Figura 5.34 – Ajustagem no bico intercambiável para facilitar a abertura do arco por toque na soldagem orbital. a) representação do problema b) modificação já concretizada



Com o perfil geométrico dos chanfros utilizados, tipo “U”, a ponta do eletrodo não tocava no fundo do chanfro devido a largura do bico intercambiável, que colidia com as bordas da junta. Uma vez que o posicionamento relativo entre o arame e o eletrodo é fixo, não é possível simplesmente aumentar a distância do eletrodo para fora do bocal, permitindo que o bocal fique fora da junta, como é feito em uma tocha de soldagem TIG convencional. Assim, a ajustagem da geometria do bico (Figura 5.34b) foi realizada de modo que o bocal conseguisse atingir o fundo da junta e abrisse o arco por toque quando necessário. Durante os testes iniciais de preenchimento, a frequência da oscilação foi aumentada gradativamente, a partir de 0,5 Hz, apresentando condição ideal, neste caso, em 2 Hz com amplitude igual a 5 mm. Os parâmetros utilizados inicialmente nos passes de preenchimento estão listados na Tabela 6.

Tabela 6 – Parametrização inicial para a soldagem de preenchimento da junta utilizando o sistema comercial

Parâmetros de Soldagem					
Posição		Corrente	Frequência	V.A	V.S
P	0° - 20°	300 A	Corrente Constante	4,5 m/min	0,5 m/min
V	20° - 160°				
SC	160° - 180°				
Parâmetros de Movimentação do Robô					
Amplitude		Progressão		Parada nas Extremidades	Frequência
5 mm		Descendente		0,3 s	2 Hz

Em relação a velocidade de alimentação de arame, também buscou-se adequá-la durante o procedimento, sendo gradualmente aumentada a partir da velocidade de 1 m/min.. Durante os procedimentos de preenchimento, foi constatado que com velocidades reguladas na font e abaixo de 2 m/min, a contaminação do eletrodo era iminente, principalmente a partir da posição vertical, devido à transferência metálica acontecer de forma intermitente.

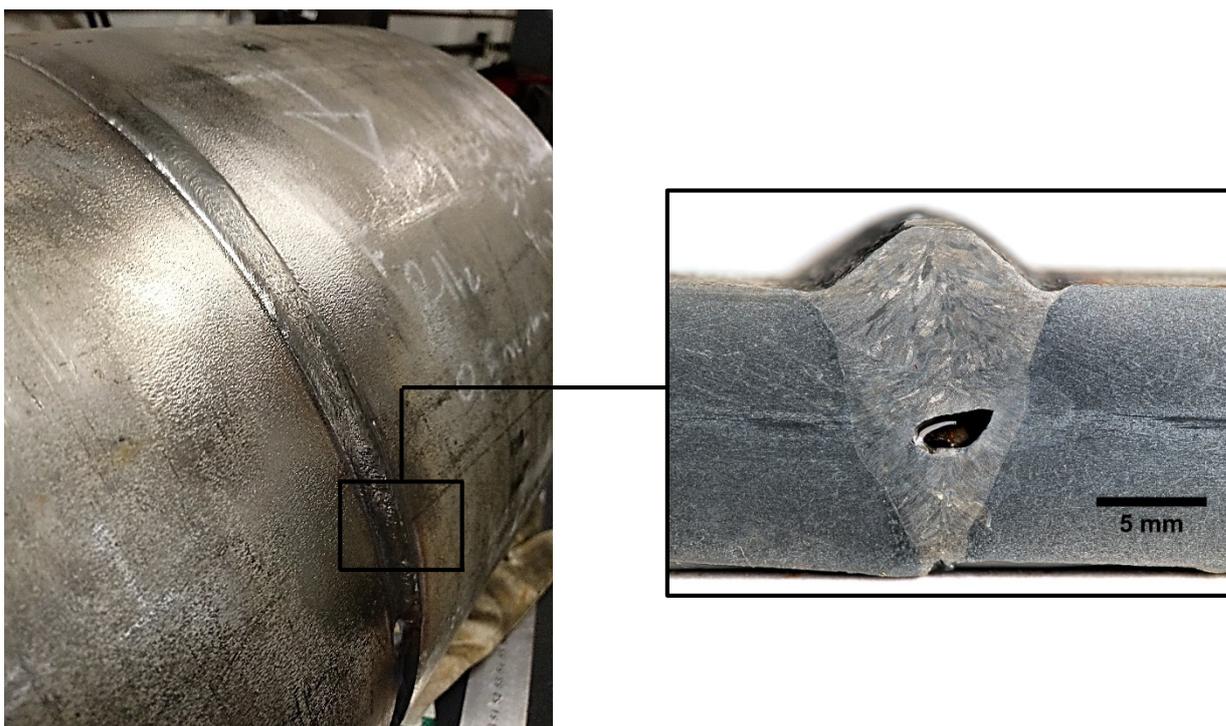
Logo durante os primeiros passes de preenchimento foi verificado que a corrente e a Vs adotadas tornavam o procedimento de enchimento muito instável. Assim, ao longo do perímetro do tubo a poça de fusão crescia demasiadamente, atingindo dimensões elevadas durante o procedimento (geralmente, a partir da posição vertical). O acúmulo de uma grande quantidade de material fundido, acarretava em escorrimento da poça e conseqüentemente na desestabilização do procedimento. Isto pode ser verificado com auxílio da Figura 5.35, onde o processo foi encerrado nesta região, propositalmente, para ilustrar a dimensão da poça que se atingia na passagem da posição vertical para sobre cabeça. Além do problema de escorrimento ocasionado pela dimensão excessiva da poça, defeitos como falta de fusão foram encontrados principalmente nas posições vertical e sobre cabeça.

Figura 5.35 – Poça de fusão já solidificada na posição vertical utilizando a parametrização da Tabela 6 dos passes de preenchimento



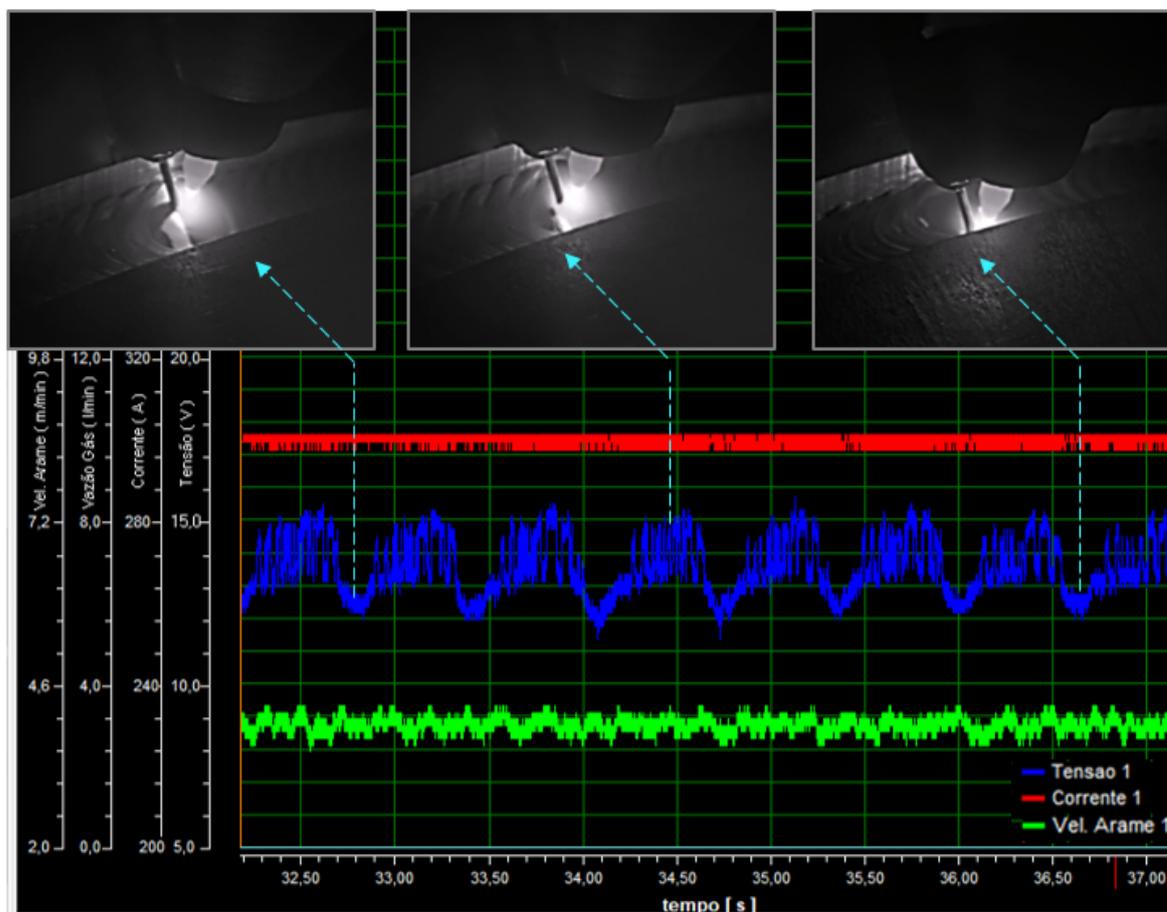
A Figura 5.36 ilustra uma macrografia realizada na região do início da posição sobre cabeça, considerada neste trabalho a região mais crítica para manter a poça estável. A amostra foi soldada utilizando os parâmetros da Tabela 6.

Figura 5.36 – Defeito atingido na posição vertical utilizando os parâmetros da Tabela 6



Com a utilização de elevada corrente e V_a , situações como contaminação do eletrodo devido ao toque com a poça de fusão, falta de material em determinadas regiões do chanfro, falta de fusão e convexidade excessiva dos cordões, foram ocorrências comuns durante o procedimento. Desta forma, a partir das constatações iniciais, optou-se em modificar a estratégia de preenchimento, utilizando menor corrente e velocidade de soldagem mais baixa. Acredita-se que desta maneira, pode-se garantir maior estabilidade da poça de fusão dentro do chanfro, possibilitando aplicar os passes de enchimento sem a necessidade da troca de parâmetros durante o percurso em 180° . Além disso, quando utilizada a parametrização da Tabela 6, foi observado que o sistema de controle do comprimento do arco implementado, neste caso, acompanhou parcialmente a dinâmica da soldagem de preenchimento, apresentando alguns picos e vales no sinal da tensão em alguns passes. Este fato pode ser observado com auxílio do oscilograma sincronizado com as imagens da soldagem de preenchimento na Figura 5.37. Neste caso, observa-se que quando o manipulador se desloca para a lateral do chanfro a transferência metálica ocorre no modo ponte, contribuído pelo baixo comprimento do arco. Em contrapartida, quando o arco cruza o meio do chanfro, é possível perceber, através da leitura do sinal da tensão, que a transferência metálica ocorre no modo intermitente. Isso não quer dizer que a ponte metálica de material fundido é rompida, pelo contrário, nesse instante a eficiência de fusão do arame não apresenta compatibilidade com a velocidade de alimentação elevada imposta. Deste modo, o arame atravessava o arco parcialmente sólido, sendo fundido majoritariamente dentro da poça de fusão, devido a V_a ser demasiadamente alta para a potência fornecida, bem como, pela variação de potência gerada pela variação da altura do arco. Além disso, é possível verificar que a dinâmica de correção do controlador não corrige em tempo a alteração da DEP.

Figura 5.37 – Oscilograma evidenciando o comportamento dos sinais de corrente, tensão e velocidade de arame, obtidos durante a soldagem de preenchimento



Uma condição relativamente estável para o procedimento de preenchimento foi atingida sendo utilizado os parâmetros listados na Tabela 7, onde obrigatoriamente, as variáveis corrente e velocidade de alimentação de arame, apresentaram a necessidade de serem diminuídas.

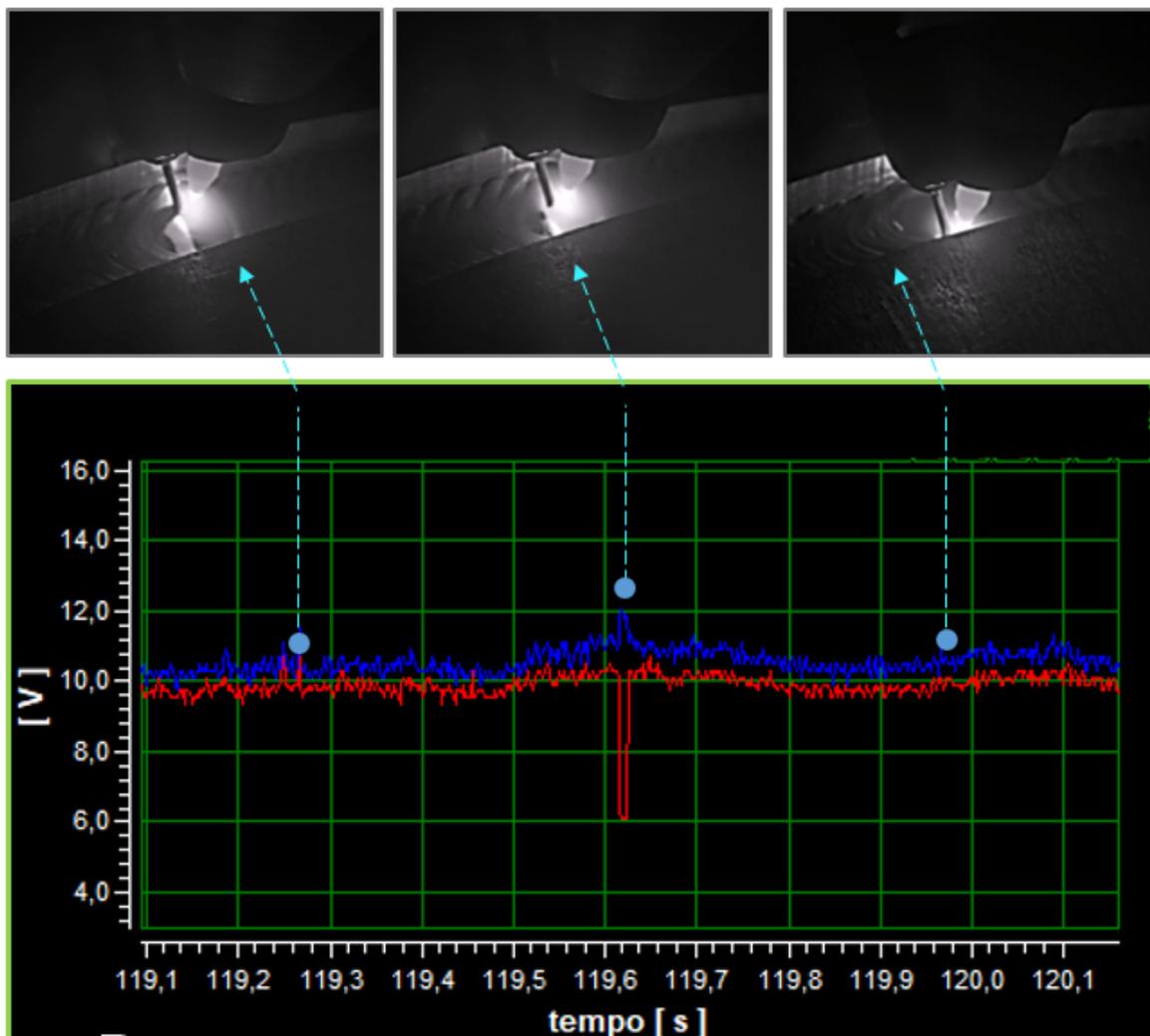
Tabela 7 – Parametrização utilizada na soldagem dos passes de preenchimento dos chanfros

Parâmetros de Soldagem					
Posição		Corrente	Frequência	V.A	V.S
P	0° - 20°	220 A	Corrente Constante	2,5 m/min	0,15 m/min
V	20° - 160°				
SC	160° - 180°				
Parâmetros de Movimentação do Robô					
Amplitude	Progressão	Parada nas Extremidades		Frequência	
5 mm	Descendente	0,3 s		2 Hz	

Para que a fabricação dos cordões de solda de preenchimento ocorresse de forma controlada, ou seja, sem escorrimento e demais defeitos, foi necessário reduzir a velocidade de arame para 2,5 m/min e a corrente para 220 A, conforme Tabela 7. Assim obteve-se um procedimento totalmente estável, o qual propiciava a formação de uma poça de fusão com dimensão reduzida e de solidificação acelerada, oposto ao procedimento realizado com a parametrização da Tabela 6.

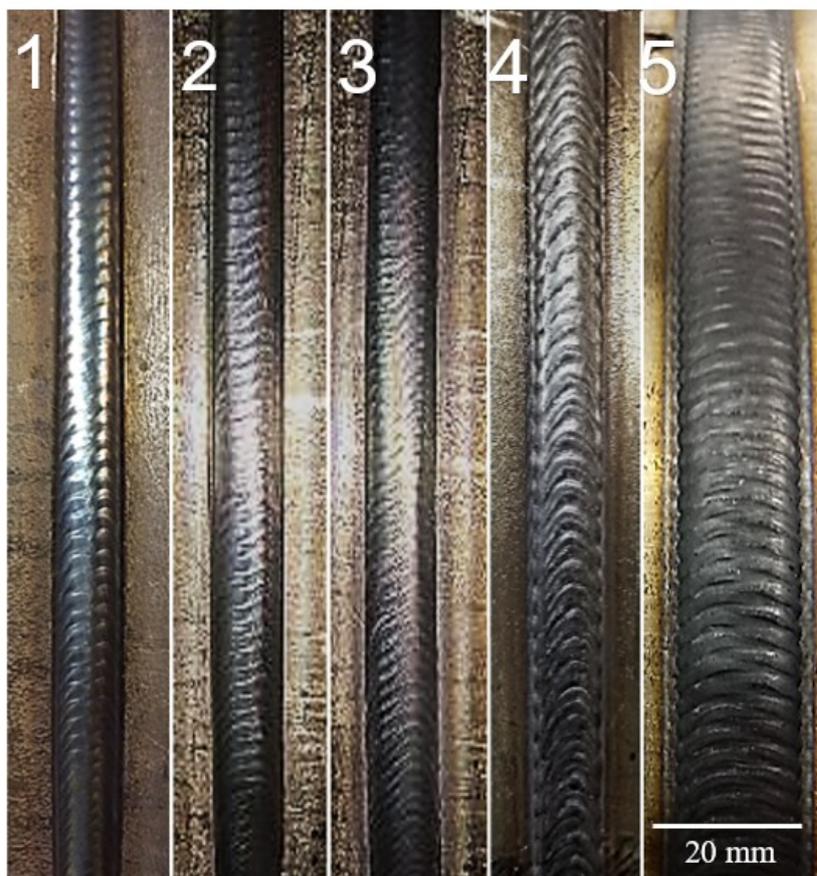
Com o estudo das melhores condições de soldagem foi possível obter um procedimento de preenchimento durante toda a trajetória programada, sem a necessidade de efetuar a troca de parâmetros ao longo da junta. A estabilidade do processo pode ser confirmada a partir da leitura dos sinais de tensão obtidos no procedimento com a parametrização da Tabela 7. Nesta aquisição, com o intuito de aprimorar a leitura e, desta forma aprimorar as conclusões, o sinal de tensão foi obtido em dois canais durante a soldagem, como mostra a Figura 5.38. O primeiro canal, correspondente à curva em azul, exibe o sinal referente à diferença de potencial entre o eletrodo e a peça, e o segundo canal, correspondente à curva em vermelho, se refere à diferença de potencial entre o eletrodo e o metal de adição. Se os dois sinais possuírem valores semelhantes, o arame apresenta o mesmo potencial da peça, e a transferência metálica resultante é considerada em ponte. Caso haja alguma perturbação no sinal entre o eletrodo e o arame, quer dizer que já não existe contato físico entre os dois, conseqüentemente, levando a conclusão que a transferência aconteceu de forma intermitente.

Figura 5.38 – Oscilação do sinal de tensão. A linha azul corresponde ao sinal da diferença de potencial entre o eletrodo e a peça. A linha vermelha corresponde ao sinal entre o eletrodo e o arame



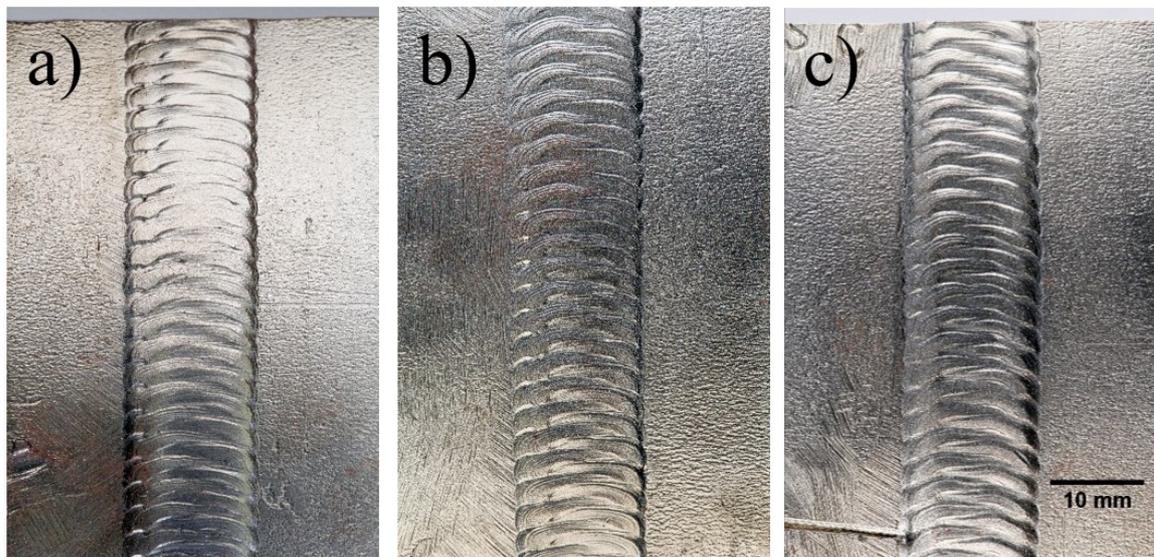
Para evitar a ocorrência de mordeduras e convexidade procedentes do último passe de preenchimento, optou-se em realizar um passe de acabamento. Neste passe, adotou-se uma amplitude de tecimento maior que a utilizada dentro do chanfro, visto que já não existe mais uma cavidade, de modo que se eliminasse qualquer imperfeição geométrica do cordão de preenchimento junto à superfície do tubo e, de fato, fornecesse acabamento superficial à junta soldada. A Figura 5.39 ilustra a aparência dos cordões realizados para o procedimento de preenchimento e acabamento das juntas. No total, sem contar o passe de raiz, a junta necessitou de cinco passes de preenchimento para ser finalizada.

Figura 5.39 – Aparência superficial característica dos passes de preenchimento fabricados com o sistema comercial TopTIG



Conforme descrito na Tabela 8, o passe de acabamento foi realizado para oferecer à junta um aspecto superficial aprimorado, além de mitigar alguma falta de continuidade do último passe de preenchimento. Desta forma, neste passe aumentou-se a amplitude da oscilação da tocha para 12 mm, visto que o eletrodo não permanece mais no interior do chanfro. Após a soldagem do passe de acabamento a junta da Figura 5.40, foi limpa e seccionada nas três posições analisadas no presente estudo, de modo a avaliar a característica superficial de todo o passe.

Figura 5.40 – Aspecto da solda de acabamento completa realizada com o processo TIG com alimentação tangencial. a) Posição plana b) vertical e c) sobre cabeça



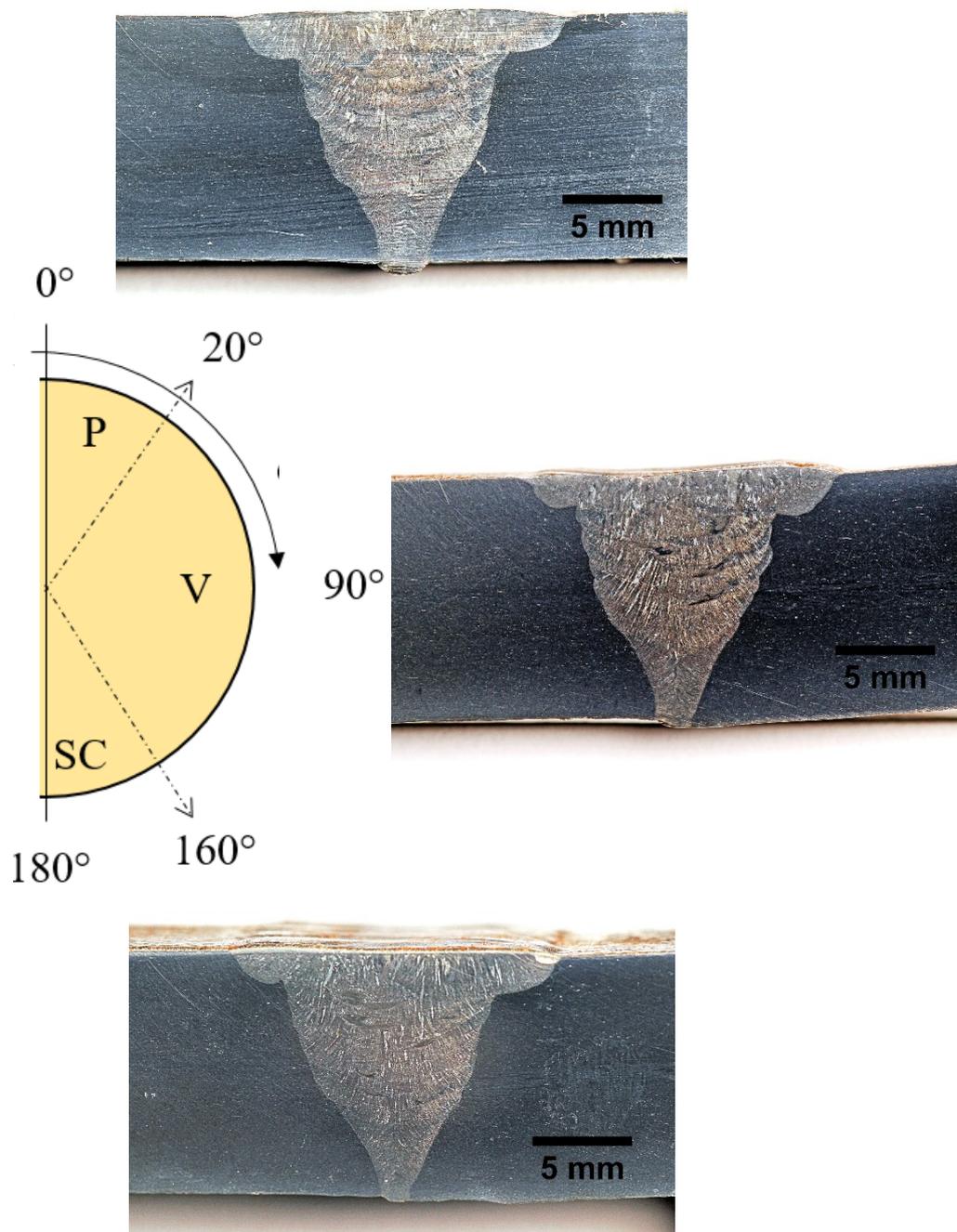
Nota-se que o perfil geométrico do cordão de acabamento mostrou-se constante nas três posições de soldagem estudadas. Este fato, se deve principalmente devido a utilização da mesma parametrização durante toda a trajetória de 180° do tubo.

Tabela 8 – Parâmetros de soldagem utilizados no passe de acabamento

Parâmetros de Soldagem					
Posição		Corrente	Frequência	V.A	V.S
P	0° - 20°	220 A	Corrente Constante	2,5 m/min	0,15 m/min
V	20° - 160°				
SC	160° - 180°				
Parâmetros de Movimentação do Robô					
Amplitude		Progressão		Parada nas Extremidades	Frequência
12 mm		Descendente		0,3 s	2 Hz

Por fim, o resultado do procedimento realizado por completo com o sistema comercial de alimentação tangencial, pode ser avaliado com auxílio das macrografias da seção transversal da junta, completamente preenchida, ilustrada na Figura 5.41. Nestas amostras é possível verificar também, o perfil da penetração da raiz realizado com o processo pulsado, com os parâmetros da Tabela 5. Não foram verificadas descontinuidades macroscópicas e a penetração foi satisfatória.

Figura 5.41 – Resultado final da soldagem do tubo de aço inoxidável utilizando o sistema comercial de alimentação tangencial



O passe de raiz das amostras ilustradas na Figura 5.41 foi realizado com o TIG pulsado, utilizando os parâmetros apresentados na Tabela 5, uma vez que, foi a melhor condição encontrada para realizar os passes de raiz nos tubos de aço inoxidável, proporcionando maior repetibilidade e robustez no procedimento. Nas macrografias, é possível notar que a penetração apresentou características

geométricas satisfatórias, sobretudo sem a presença de concavidade na posição sobre cabeça.

Com o intuito de verificar a viabilidade do bocal desenvolvido na soldagem TIG orbital e a capacidade de produzir soldas comparáveis às do sistema comercial de alimentação tangencial, foi realizado o mesmo procedimento — também realizados no passe de raiz— para efetuar o preenchimento da junta. Com isso, os parâmetros da Tabela 5 foram empregados. Contudo, na tentativa de implementar a utilização dos equipamentos desenvolvidos no laboratório com a mesma parametrização empregada no equipamento comercial (TopTIG e robô Motoman), obteve-se muitas dificuldades relativas à estabilidade do processo e a repetibilidade. Foi verificado momentos de estabilidade intercalados com perfurações da junta, situados dentro de uma faixa estreita de operação, o que tornou a utilização do modo *keyhole* insatisfatória pela falta de repetibilidade nas soldas realizadas. A Figura 5.42 ilustra uma junta soldada com os parâmetros da Tabela 5.

Figura 5.42 – Exemplo de junta soldada com os parâmetros desenvolvidos para o equipamento comercial e transpostos para o bocal desenvolvido



Especialmente por este motivo, decidiu-se modificar a metodologia de alta produtividade, com elevadas correntes e velocidades de soldagem. Portanto, as soldas apresentadas na Figura 5.43 foram realizadas no modo operacional *melt-in*, conforme citado no item 5.3.1. Assim, empregou-se uma parametrização sobre a qual não se utilizava elevada velocidade de soldagem e velocidade de alimentação de arame, comparadas às utilizadas com o equipamento comercial. Além disso, em

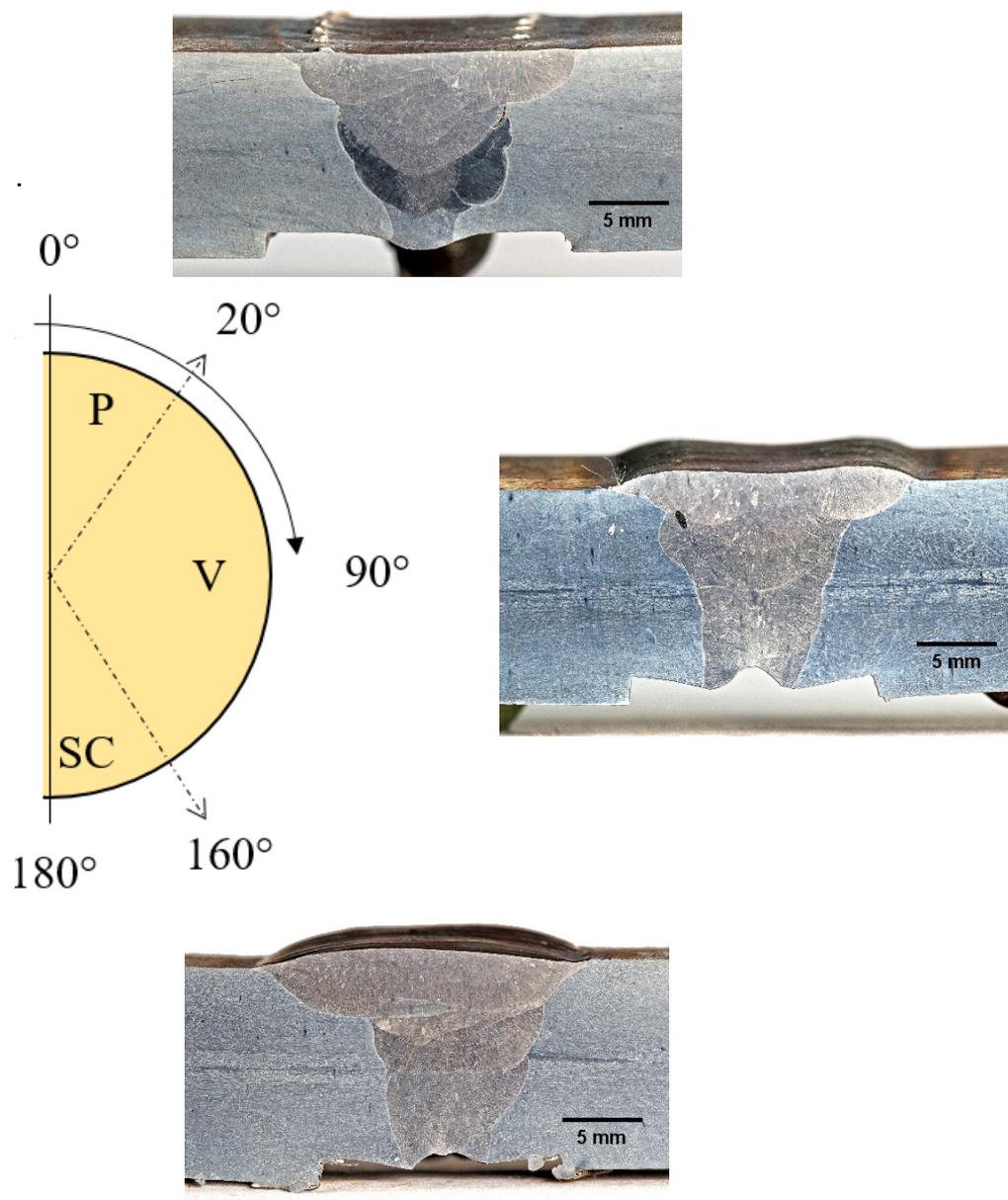
virtude de já ter se obtido um procedimento orbital sem realizar a troca de parâmetros, nesta etapa decidiu-se utilizar este artifício, visto que já se operava com o equipamento dedicado. Ao mesmo tempo, pelo fato de se utilizar menor corrente de soldagem e relação aos testes anteriores, optou-se adicionalmente pela utilização de uma pequena abertura de raiz de 1 mm de modo a verificar se esta estratégia facilitaria a obtenção de penetração total na raiz. Desse modo foram definidos cinco pontos na superfície do tubo e efetuadas quatro trocas de parâmetros. A condição mais favorável, durante os testes no modo *melt-in* com o bocal de alimentação tangencial desenvolvido foi alcançada empregando os parâmetros listados na Tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros utilizados na soldagem com o bocal desenvolvido operando no modo *melt-in* para o passe de raiz

Parâmetros de soldagem					
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5
Posição	Plana	Vertical	Vertical	Sobre cabeça	Sobre cabeça
Tensão Méd.	13,3 V	13,2 V	12,7 V	12,5 V	11,9 V
Corrente	180 A	210 A	190 A	180 A	180 A
V.a	1,0 m/min	1,0 m/min	1,0 m/min	1,0 m/min	0,9 m/min
V.s	0,22 m/min				

A Figura 5.43 ilustra as macrografias das amostras soldadas por completo com a bancada composta pelo Tartílope V4 e o bocal refrigerado com alimentação tangencial. Os parâmetros utilizados para realizar os passes de preenchimento foram os mesmos descritos na Tabela 7.

Figura 5.43 – Resultado final da soldagem do tubo de aço inoxidável utilizando Tartílope V4, bocal desenvolvido e fonte IMC

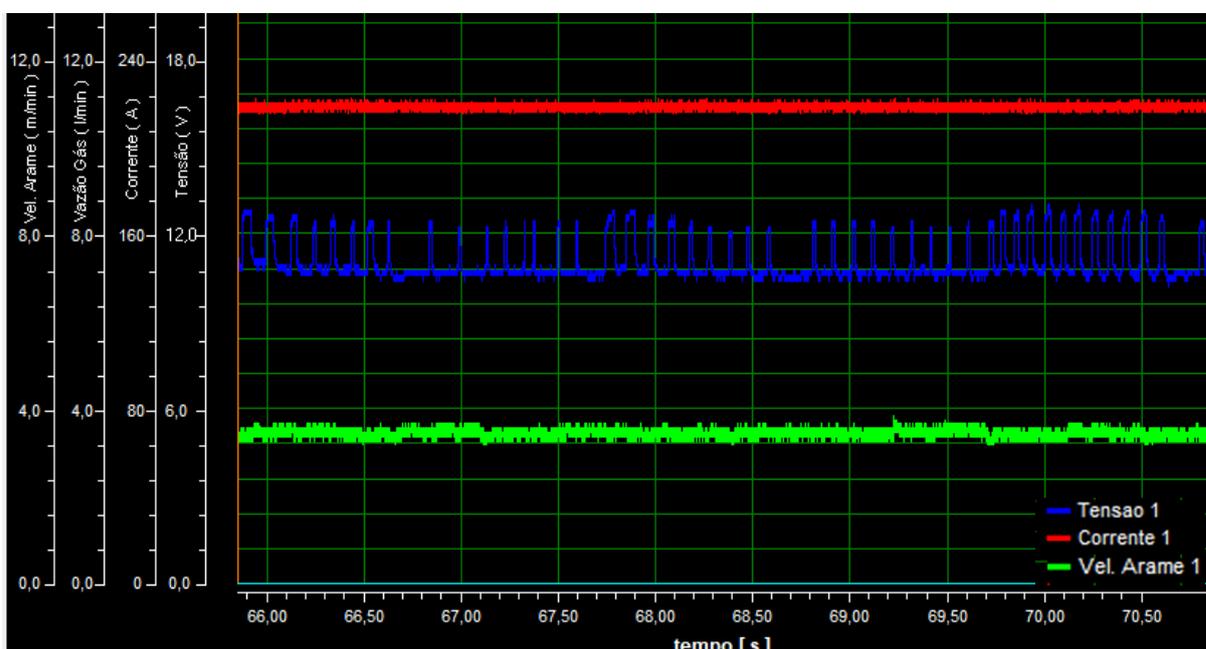


Na região da posição plana, é nítida a presença de reforço na raiz. Entretanto, para a posição vertical descendente e sobre cabeça, a raiz não apresentou o mesmo aspecto, pois, em alguns casos, como os resultados representados na Figura 5.43, houve a presença de uma concavidade na raiz. Uma das hipóteses é que isto ocorreu devido a corrente de soldagem ter sido aumentada para 210 A na posição vertical, e também, pelo fato da utilização de abertura de 1 mm na raiz. Estes dois

aspectos somados, possivelmente contribuíram de forma negativa para obtenção de uma raiz sem defeitos.

Durante os testes de preenchimento com o intuito de avaliar o limite operacional do bocal refrigerado com alimentação tangencial no que se refere ao aumento de deposição de arame, buscou-se aumentar a V_a gradualmente a partir do ponto considerado ideal, ou seja, os parâmetros da Tabela 7. Desta forma, comprovou-se que, de fato, é possível aumentar a V_a , partindo de uma corrente de 220 A e arame de 1,2 mm de diâmetro utilizando o bocal refrigerado com alimentação tangencial. No entanto, apesar da possibilidade de atingir velocidades de arame relativamente elevadas, os cordões de solda fabricados são considerados inutilizáveis para esta aplicação. O oscilograma da Figura 5.44, evidencia o patamar de velocidade de arame atingido de 3,5 m/min, bem como demonstra a instabilidade do processo pela leitura do sinal instável da tensão.

Figura 5.44 – Aumento da V_a de forma gradual até o atingimento da instabilidade da transferência metálica (V_a média atingida: 3,5m/min)



Os cordões apresentaram convexidade excessiva, falta de fusão nas bordas do chanfro e escorrimento da poça caracterizando condições inaceitáveis para o preenchimento do chanfro, principalmente fora da posição plana. Isso pode ser avaliado com o auxílio da Figura 5.45, a qual ilustra a geometria de um dos cordões de preenchimento, sobre o qual foi testada a máxima velocidade de arame antes da

desestabilização da transferência metálica no procedimento orbital, atingido uma V_a de até 3,5 m/min.

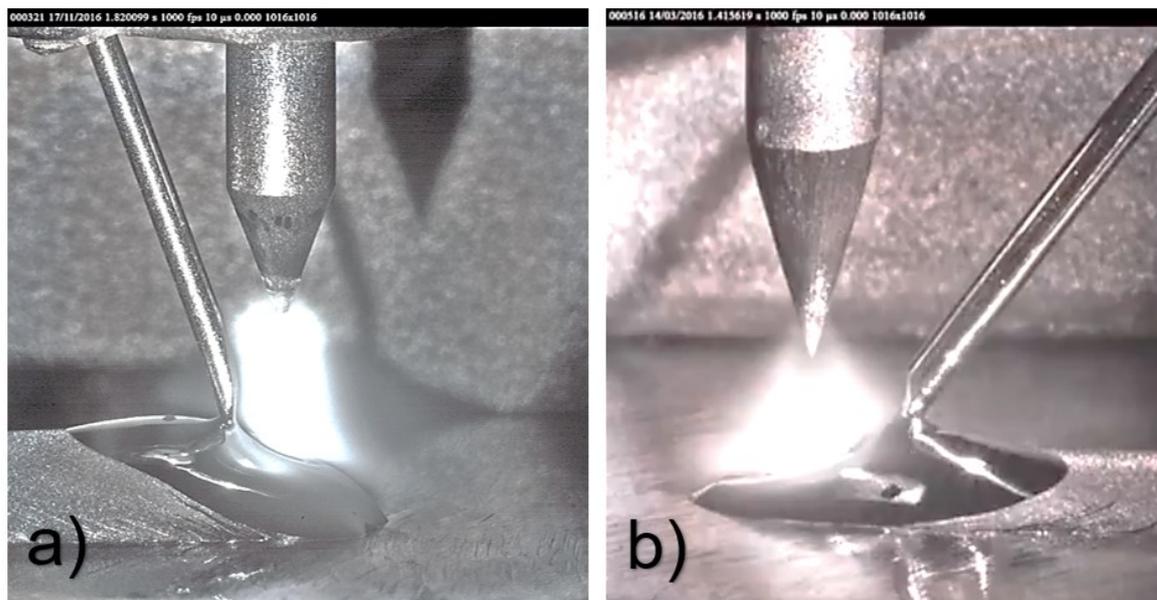
Figura 5.45 – Exemplo cordão de solda do passe de preenchimento com V_a de 3,5m/min



Além de comprometer a vida útil do eletrodo em relação à contaminação e provocar súbito aumento do comprimento do arco, pois o arame não era totalmente fundido pelo arco sendo inserido a uma velocidade relativamente alta o que, por consequência, afastava a tocha da peça. Deste modo, o cordão apresenta convexidade exagerada no meio e não oferece fusão nas bordas do chanfro, devido a solidificação acelerada da poça de fusão com o aumento de material de adição.

A fim de compreender os fenômenos envolvidos no processo com alimentação tangencial referente ao argumento de maior taxa de alimentação de material, discutido na fundamentação teórica deste trabalho, uma análise foi realizada por meio de filmagem em alta velocidade sobre chapa plana. Foi verificado uma interação entre arco e arame que, potencialmente, pode induzir o aumento da eficiência de fusão do arame nesta modalidade. A interação citada, é comparada entre o TIG convencional e com alimentação tangencial e pode ser avaliada na Figura 5.46.

Figura 5.46 – Comparação da interação entre arco e arame no processo TIG. a) alimentação tangencial com 20° b) alimentação convencional com 45°



A partir das imagens retiradas de uma filmagem em alta velocidade de dois procedimentos TIG distintos, fica evidente que quanto mais próximo o arame estiver do arco — disponibilizando assim uma área de contato muito maior — mais exposto e sujeito estará o arame a um tipo de pré-aquecimento conferido pelo arco, antes mesmo de tocar a poça de fusão. Assim, é possível verificar na Figura 5.46, a vantagem que a alimentação tangencial fornece quando comparada à inserções convencionais. Por outro lado, isso pode ser uma desvantagem quando se considera a aplicação de soldagem orbital dentro do chanfro, onde uma das principais funções do arco é fundir as paredes do chanfro, assegurando com que não se tenha falta de fusão. Uma vez que o arco está ancorado sobre o arame, diminuiu a probabilidade do arco atuar na fusão na junta. Ou seja, apesar do processo TIG com alimentação tangencial proporcionar maior taxa de fusão de arame, é difícil conseguir procedimentos de alta taxa de deposição livres de defeitos. Diante do exposto, pode-se inferir que nesse caso o aquecimento anódico possui um papel essencial na contribuição do aumento da taxa de fusão de arame no processo TIG.

Por fim, é necessário deixar claro que em todos os testes com o processo TIG orbital, o estudo dos melhores parâmetros para se realizar o procedimento com penetração adequada e livre de defeitos como mordeduras, falta de fusão, falta de penetração, perfuração, porosidades e concavidades excessivas na raiz sempre esteve dentro de uma faixa extremamente estreita.

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho buscou contribuir para a ampliação das informações técnicas e científicas a respeito da variante TIG com alimentação tangencial, no que se refere aos equipamentos, métodos e procedimentos na soldagem TIG orbital.

Com relação às necessidades tecnológicas que foram implementadas, como um sistema experimental de controle do comprimento do arco, capaz de monitorar e controlar a tensão do arco TIG no robô antropomórfico, um pequeno passo foi dado. Anteriormente ao estudo, não era possível empregar o processo TIG no robô com a correção do comprimento do arco de forma automática. Isto somente era possível, com a utilização de dispositivos eletromecânicos (AVC) os quais não faziam parte do sistema do robô, podendo apresentar algumas restrições quanto ao seu uso nos manipuladores robóticos, como as dimensões dos equipamentos e o peso. Após a implementação deste recurso, tornou-se possível operar o processo TIG no robô antropomórfico apenas programando sua tensão de referência. Contudo, o sistema implementado apresentou desempenho considerado satisfatório somente em velocidade de soldagem relativamente baixa no processo TIG. Além disso, desenvolveu-se um equipamento capaz de ser integrado em diversos outros sistemas convencionais do processo TIG, um bocal refrigerado com alimentação tangencial. Este bocal foi empregado nas soldas realizadas e demonstrou robustez, confiabilidade e semelhança operacional com o equipamento comercial já consolidado, como o sistema TopTIG.

No que se refere ao procedimento de soldagem TIG orbital, foram estudados especificamente procedimentos de passe de raiz e preenchimento dos chanfros com a técnica de alimentação tangencial. Nos testes de soldagem do passe de raiz ficou evidenciado que o procedimento que apresentou maior robustez e repetibilidade, no presente trabalho, está relacionado com o uso da corrente pulsada. Nesse contexto, um importante resultado obtido foi a possibilidade de realizar o procedimento de soldagem orbital da raiz sem realizar a troca de parâmetros ao longo da junta em velocidade de soldagem relativamente elevada com o equipamento comercial. Assim, os resultados obtidos com esta variante do processo TIG nesta aplicação, mesmo que dentro de uma faixa operacional considerada estreita, diminuem a diferença entre o TIG e o MIG/MAG relacionada à produtividade. Entretanto, a operação com o sistema TIG mecanizado, especialmente para

realização do passe de raiz, demonstrou que para se atingir resultados satisfatórios é fundamental que a junta a ser soldada, de modo geral, apresente variações muito pequenas sobretudo em relação a aberturas e espessura da face de raiz. No presente estudo, o processo apresentou elevada sensibilidade à tais imperfeições. Para aplicação do procedimento em campo, esse fato é extremamente significativo, pois, dificilmente serão atingidas perfeitas condições na fabricação das juntas, já que mesmo em laboratório e com o uso de equipamentos específicos de fabricação de chanfros, essa condição não foi obtida.

Quanto ao procedimento de preenchimento do chanfro, buscou-se avaliar o aumento da produtividade do processo TIG, a partir da alegação de maior taxa de deposição inferida à técnica de alimentação tangencial. Apesar da técnica, de fato, permitir alcançar maiores taxas de fusão de arame, o procedimento apresentou uma grande complexidade na sua parametrização e execução, não sendo possível obter procedimentos de soldagem orbital de tubos satisfatórios quando se utilizou velocidades de arame elevadas no preenchimento. Os procedimentos de soldagem de preenchimento livre de defeitos foram obtidos com apenas 2,5 e 1,0 m/min de velocidade de arame para o sistema comercial e desenvolvido, respectivamente. Sendo assim, o maior benefício do TIG com alimentação tangencial para a soldagem de tubulação não é, precisamente, o aumento de produtividade em relação a taxa de fusão, mas sim, a facilidade de operação pelo fato do arame estar em uma posição fixa e incorporado ao corpo do bocal.

Ressalta-se que apesar da potencialidade da aplicação do processo TIG com alimentação tangencial na soldagem orbital, é necessário que um número muito maior de soldagens seja realizado, de modo a se obter dados mais precisos relacionados à repetibilidade do processo. Assim, considera-se que ainda existem muitos desafios até que a soldagem TIG orbital automática figure o cenário industrial brasileiro e tenham um nível de desenvolvimento suficiente, sobretudo, desafios ligados à fabricação e manutenção da qualidade das juntas fabricadas em campo. Apesar disso, conclui-se que o presente trabalho contribuiu para o estabelecimento de infraestrutura, integração de sistemas e equipamentos capazes de ampliar a gama de investigações e aplicações do processo TIG com alimentação tangencial de arame.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados apresentados neste trabalho admitem a ampliação do estudo de forma centralizada em alguns pontos importantes, especialmente em relação ao procedimento de soldagem TIG orbital. Durante o trabalho alguns fatores mostram potencial para futuros estudos. Entre eles pode ser citado:

- O estudo do sincronismo de técnicas modernas do processo TIG como alimentação tangencial e alimentação dinâmica de arame, de modo a obter as vantagens de cada técnica;
- Pesquisa e desenvolvimento englobando a alimentação tangencial no projeto de equipamentos voltados à soldagem orbital de dutos com chanfro estreito ou soldagem interna de dutos, visto que o processo apresentou vantagens quanto ao bocal alimentador compacto;
- Estudos de estratégias de processo para melhorar a estabilidade da poça de fusão fora da posição plana para que se obtenha um procedimento estável com velocidades de alimentação de arame elevadas para o processo TIG;
- Aprimorar o desempenho dos equipamentos envolvidos no controle do comprimento do arco no robô antropomórfico, permitindo realizar estudos da técnica voltados à manufatura aditiva, onde é necessário realizar trajetórias que englobam geometrias complexas.

REFERÊNCIAS

A.P.I 1104 Welding of Pipelines and Related Facilities. **American Petroleum Institute**, 2005.

ADI, P.; ISMAR, H.; PETAR, T. Advantages of MAG-STT welding process for root pass welding in the oil and gas industry. **TEM Journal**, v. 5, p. 76, 2016.

AIR LIQUIDE. **Especificações de procedimentos de soldagem**, Paris, 2008.

AIR LIQUIDE WELDING. **TopTIG - A new robot welding process for industry**, 2018. Disponível em: <<http://files.engineering.com/download.aspx?folder=f9d6f4ee-eb78-4cc3-8ded-984cb16af90c&file=TOPTIG.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2018.

ANSI/AWS A3.0-94. **Standard Welding Terms and Definitions**, Maio 1994.

BARBIERI, J. C. **Produção e transferência de tecnologia**. São Paulo: Ática S.A, 1990.

BLACKMAN, S. A.; DORLING, D. V. Technology advancements push pipeline welding productivity. **Welding journal**, v. 79, n. 8, p. 39-44, Agosto 2000.

CHO, D. W. et al. A study on V-groove GMAW for various welding positions. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 213, n. 9, p. 1640-1652, 2013.

CHOWDARY, B. V.; MAHARAJ, R. R.; LEWIS, W. G. Development of Welding Parameters to Perform Root Pass Welding Using a Mechanised GTAW Process: A Case Study. v. 32, 2010. **The West Indian Journal of Engineering**, v. 32, p. 20-27, Janeiro 2010. ISSN 0511-5728.

CUEHL, J. GMAW Options Offer Increased Productivity for Pipe Fab Shops. **Welding Journal**, v. 87, p. 66-68, Junho 2008.

DÍAZ, V. V.; CORTES, J. M.; ALVAREZ, A. E. A contribution to the study of the cold wire TIG process in the flat, horizontal and overhead position with new torch designs and wire feed methodologies. **Welding International**, 17 Fevereiro 2017. 1754-2138.

ESAB, C. D. C. Disponível em:
<http://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_tig_gtaw.cfm>.
Acesso em: 22 Agosto 2018.

FIGUEIRÔA, D. W. E. A. Influência da posição e dos parâmetros de soldagem na soldagem TIG orbital aplicada a tubulações de aço baixo carbono. **Soldagem & Inspeção**, v. 20, n. 4, p. 446-455, 2015.

FORTAIN, J. M.; GUIHEUX, S.; OPDERBECKE, T. Thin-sheet metal welding. **Welding International**, v. 27, p. 30-36, Janeiro 2013.

FORTAIN, J.-M.; RIMANO, L.; VAIDYA, V. Innovative Process Improves Welding of Sheet Metal Parts - A new welding process combines the quality of gas tungsten arc with the speed and penetration characteristics of gas metal arc. **Welding Journal**, p. 01-08, Janeiro 2008.

FRONIUS, 2017. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=fbOFZgu5TPs>>. Acesso em: 12 jul. 2019.

GICK, A. E. F.; QUIGLEY, M. B. C.; RICHARDS, P. H. The use of electrostatic probes to measure the temperature profiles of welding arcs.. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 6, n. 16, p. 1941-1973, jun. 1973.

GODINHO, C. Avaliação Experimental do Processo de Soldagem TIG Automatizado Alimentado com Reduzidos Ângulos de Inserção de Arame em Relação ao Eletrodo **Mestrado em Engenharia Mecânica [Dissertação] Universidade Federal de Santa Catarina**, Florianópolis, 2017.

GONZÁLEZ, C. G. E. A. Estudio Comparativo de la Productividad y Calidad Obtenidas en la Soldadura de Tubos de Calidad T9 Empleados en el Sector Petroquímico, Mediante los Procesos TIG, HW-TIG y PAW. **Soldagem & Inspeção**, v. 17, p. 264-270, 2012.

HADDAD, G. N.; FARMER, A. J. D. Temperature determinations in a free-burning arc. I. Experimental techniques and results in argon. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 17, n. 6, p. 1189, 1984.

HENON, B. K. Advances in automatic hot wire GTAW (TIG) welding. Disponível em: <<http://www.arcmachines.com>>. Acesso em: 27 Abril 2018.

HORI, K. et al. **Hot-Wire TIG Welding Apparatus**. US4614856A, 30 set. 1986.

IMC, S. Disponível em: <<https://www.imc-soldagem.com.br/pt-br/equipamentos/sistemas-de-monitoramento/sap-v4>>. Acesso em: 27 Agosto 2019.

KEY, J. F.; CHAN, J. W.; MCILWAIN, M. E. Process variable influence on arc temperature distribution. **Welding Journal**., v. 62, n. 7, p. 179, 1983.

KINDERMANN, R. M. Soldagem orbital do passe de raiz: algoritmos para controle adaptativo por meio de sensoriamento laser. **Mestrado em Engenharia Mecânica [Dissertação] - Universidade Federal de Santa Catarina**, Florianópolis, 2016.

KOBAYASHI, K. E. A. Practical application of high efficiency twin-arc TIG welding method (SEDAR-TIG) for PCLNG storage tank.. **Welding in the World**, v. 48, n. 7-8, p. 35-39, 2004.

KOBAYASHI, M.; SUGA, T. A method for the spectral temperature measurement of a welding arc.. **Arc Physics and Weld Pool Behavior**., Londres, v. 1, p. 25-37, Maio 1979.

LANCASTER, J. F. **The Physics of Welding**. 2ª. ed. [S.I.]: Pergamom, 1986.

LENG, X.; ZHANG, G.; WU, L. The characteristic of twin-electrode TIG coupling arc pressure. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 39, n. 6, p. 1120, 2006.

Lincoln Electric. **Welding Processes**, 2018. Disponível em: <<https://www.lincolnelectric.com/en-gb/automation/Pages/welding-processes-toptig.aspx>>. Acesso em: 20 nov. 2018.

LINCOLN Electric. **Process and Theory**, 2018. Disponível em: <<https://www.lincolnelectric.com/en-us/support/process-and-theory/pages/stt-pipe-welding-detail.aspx>>. Acesso em: 13 nov. 2018.

LORCH. **Scientific publications**, 2015. Disponível em: <<https://www.lorch.eu/en/knowledge/scientific-publications/scientific-publication-avc-seam-tracking-for-tig-welding/>>. Acesso em: 08 jan. 2019.

LOTHONGKUM, G.; CHAUMBAI, P.; BHANDHUBANYONG, P. TIG pulse welding of 304L austenitic stainless steel in flat, vertical and overhead positions. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 89, p. 410-414, 1999.

MANNION, B.; HEINZMAN, J. Orbital tube welding. **Flow Control**, Dezembro 1999.

MENDONÇA, F. K. Evolução da técnica de seguimento de junta via sensoriamento do arco para operações de soldagem em posições forçada. **Mestrado em Engenharia Mecânica [Dissertação] Universidade Federal de Santa Catarina**, Florianópolis, 2013.

OLIVARES, E. A. G. Uma abordagem técnica e científica do processo TIG Keyhole a luz de novas tecnologias e aspectos comparativos com o processo Plasma. **Mestrado em Engenharia Mecânica [Dissertação] Universidade Federal de Santa Catarina Florianópolis**, Florianópolis, 2015.

OPDERBECKE, T.; GUIHEUX, S. TOPTIG: robotic TIG welding with integrated wire feeder. **Welding International**, v. 23, p. 523-529, 2009. ISSN 7.

PAES, L. E. S. Soldagem TIG orbital: técnica de alimentação dinâmica do arame visando aumento na produtividade. **Mestrado em Engenharia Mecânica [Dissertação] Universidade Federal de Santa Catarina**, Florianópolis, 2016.

PETROBRAS. **Nossas Atividades**, 2018. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/gasodutos/>>. Acesso em: 26 Novembro 2018.

PETROBRAS. Plano de Negócios e Gestão 2019-2023. **Site da Petrobras**, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/plano-estrategico/plano-de-negocios-e-gestao/>>. Acesso em: 6 Dezembro 2018.

PETROBRAS, 2019. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/pre-sal/>>. Acesso em: 20 Julho 2019.

PIGOZZO, I. O. **Soldagem TIG Orbital: otimização de equipamentos e prospecções tecnológicas para procedimentos de passe de raiz. Mestrado em Engenharia Mecânica [Dissertação] Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis 2015.**

POLYSOUDE. The Orbital Welding Handbook, Janeiro 2016. Disponível em: <<http://www.polysoude.com>>. Acesso em: 12 dez. 2018.

REIS, R. P.; SCOTTI, A. **Fundamentos e prática da soldagem a plasma.** Artliber, 2007.

RIFFEL, K. C. **Avanços tecnológicos do processo TIG: técnicas inovadoras de alimentação de arame e procedimentos automatizados como contribuição para a união de tubos internamente cladeados. Mestrado em Engenharia Mecânica [Dissertação] Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis 2018.**

RODRIGUEZ, N. E. A. Wire and arc additive manufacturing: a comparison between CMT and TopTIG processes applied to stainless steel. **Welding in the World**, v. 62, n. 5, p. 1083–1096, Setembro 2018.

ROSA, A. F. et al. **Study of Operational Limits of Semiautomatic TIG Welding Process with Variation of the Material Insertion (wire feed) Angle Provided by a Special Nozzle**, 2018. Disponível em: <<http://www.labsolda.ufsc.br/public/artigos/congressos>>. Acesso em: 15 jan. 2019.

RUDY, J. F. Development and application of Dabber Gas Tungsten Arc Welding for repair of aircraft engine, seal teeth. **ASME 1982 International Gas Turbine Conference and Exhibit**, 1982.

SARTORI, F. Tecnologias e Técnicas Modernas do Processo MIG/MAG para o Passe de Raiz em Soldagem Orbital de Tubos **Mestrado em Engenharia Mecânica [Dissertação] Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.**

SARTORI, F. E. A. Uma Análise Comparativa entre Diferentes Versões de Variantes Modernas do Processo MIG/MAG para o Passe de Raiz em Soldagem Orbital. **Soldagem e Inspeção**, São Paulo, v. 22, n. 4, p. 442-452, Outubro 2017.

SCHWEDERSKY, M. B. Um estudo da eficiência e produtividade dos principais processos de soldagem a arco. **Mestrado em Engenharia Mecânica [Dissertação] Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.**

SCHWEDERSKY, M. B. **Estudo e desenvolvimento do processo TIG duplo eletrodo. Doutorado em Engenharia Mecânica [Tese] Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.**

SCHWEDERSKY, M. B.; DUTRA, J. C. . O. M. P.; SILVA, R. H. G. High productivity TIG welding: influence of shielding gases on the limit speed for defect formation. **Soldagem & Inspeção**, v. 16, n. 4, p. 333-340, 2011.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: Maior entendimento, melhor desempenho**. 2ª. ed. São Paulo: Artliber, 2014.

SHIRALI, A. A.; MILLS, K. C. The Effect of Welding Parameters on Penetration in GTA Welds. **Welding Journal**, v. 72, p. 347, 1993.

SILVA, R. N. Caracterização do processo de soldagem TIG com alimentação de arame dinâmica em alta frequência. **Trabalho de Conclusão de Curso**, Florianópolis, 2016.

SILVA, R. H. G. E. et al. TIG welding process with dynamic feeding: a characterization approach. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 96, p. 4467–4475, Junho 2018. ISSN 1433-3015.

SPS Soldagem, 2019. Disponível em: <<http://www.sps-soldagem.com.br/avc.php>>. Acesso em: 12 Julho 2019.

THORNTON, M. F. Spectroscopic determination of temperature distributions for a TIG arc. **Journal of Physics D: Applied Physic**, v. 26, n. 9, p. 1432, 1993.

TURYK, E. et al. Technological Conditions of Mechanised TIG Welding using Various Systems Adjusting Current and Electrode Wire Feeding Parameters. **Biuletyn Instytutu Spawalnictwa**, v. 59, n. 5, p. 13-18, 2015.

WEGLOWSKI, M.; CHMIELEWSKI, T.; KUDIŃA, K. Productivity assessment of the low-energy SpeedRoot welding process in PG position. **Welding International**, v. 30, p. 192-195, 2016.

WILSON, M. TIP TIG: New Technology for Welding. **Industrial Robot**, v. VI, p. 462-466, 2007.

XIRIS. Disponível em: <<https://www.xiris.com/products/open-arc-cameras/>>. Acesso em: 27 Agosto 2019.

YAPP, D.; BLACKMAN, S. A. Recent developments in high productivity pipeline welding. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 26, p. 89-97, 2004.