

Francisco Sartori

**TECNOLOGIAS E TÉCNICAS MODERNAS DO
PROCESSO MIG/MAG PARA O PASSE DE RAIZ EM
SOLDAGEM ORBITAL DE TUBOS**

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

Orientador: Prof. Jair Carlos Dutra, Dr. Eng.

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

Florianópolis, SC
2016

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

Sartori, Francisco

Tecnologias e técnicas modernas do processo MIG/MAG
para o passe de raiz em soldagem orbital de tubos /
Francisco Sartori ; orientador, Jair Carlos Dutra ;
coorientador, Régis Henrique Gonçalves e Silva. -
Florianópolis, SC, 2016.
155 p.

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

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Soldagem orbital MIG/MAG. 3.
Passe de raiz. 4. Procedimento mecanizado. I. Dutra, Jair
Carlos. II. Silva, Régis Henrique Gonçalves e. III.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós
Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Francisco Sartori

**TECNOLOGIAS E TÉCNICAS MODERNAS DO
PROCESSO MIG/MAG PARA O PASSE DE RAIZ EM
SOLDAGEM ORBITAL DE TUBOS**

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

Florianópolis, 13 de Julho de 2016.

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

Banca Examinadora:

Prof. Jair Carlos Dutra, Dr. Eng. – Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

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

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

Raul Gohr Júnior, Dr. Eng.
IMC – Soldagem

Giovani Dalpiaz, Dr. Eng.
PETROBRAS

Dedico este trabalho a minha família em especial aos meus pais, José Luiz e Amélia e a minha namorada Camila.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, ser maior que ilumina e abençoa minha caminhada diária.

Meus sinceros agradecimentos e gratidão a todas as pessoas que participaram direta e indiretamente dessa jornada de pleno conhecimento e de crescimento pessoal e profissional.

Aos professores orientadores, Prof. Dr. Jair Carlos Dutra e Prof. Dr. Régis Henrique Gonçalves e Silva, pela oportunidade, conhecimentos e experiências transmitidos ao longo desse período; ao Dr. Raul Gohr Jr., pelo desenvolvimento e aperfeiçoamento das fontes de soldagem e sua disposição aos questionamentos pertinentes ao processo; ao soldador e amigo, Cléber Guedes, pelo apoio no desenvolvimento prático dos ensaios realizados; aos colaboradores do setor de projetos, João Facco, Mário César do Nascimento, Gean Brum, Marcus Barnetche e do setor de eletrônica, Fernando Costenaro, Ricardo Campagnin e Felipe Kalil, por todo o desenvolvimento e suporte dos equipamentos utilizados; a Guilherme Bernhard e Gabriel Fraga, pela ajuda direta na preparação e realização dos ensaios; a Márcia Thiel, Cleber Marques, Mateus Schwedersky e Giovanna Faraco, pela gestão administrativa; a Marcelo Okuyama, pelo suporte gráfico de imagens e vídeos; à Prof^a. Cleide Marqueze.

Agradecimento especial a todos os integrantes e amigos do LABSOLDA, que proporcionaram momentos de sabedoria e descontração nessa importante etapa da minha vida. Em especial ao Erick (Chileno), Rafael Barbosa, Alberto Bonamigo, Ivan Pigozzo, Renan, Luiz Paes, Cirino, Cassiano, Jônathas Alves, Gustavo Sousa, Ramon, Renon, Bidese, Direne, Guilherme Weizenmann, Kaue, Larissa, Mateus Hoffeman, Rafael Bernardi, Danilo, Goiano, Everton, Daniel Ferrari, Rafael Nunes, Gustavo Truppel, Víctor, Júlia, Teco, Natália, Jamal, Pedro, Nathan, Adrian, Adroaldo, Tiago, Fernando, Hemerson, Alberto Borges, Arthur, Yasmin.

A toda minha família, em especial aos meus pais e a minha namorada Camila, pelo amor, incentivo, compreensão e apoio incondicional.

Ao programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da UFSC e à Agência Nacional do Petróleo (ANP), pelo apoio financeiro.

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível”.

(Charlie Chaplin)

RESUMO

Este trabalho relata uma contribuição ao desenvolvimento de tecnologias e de equipamentos aplicados à soldagem orbital de tubos. A temática foi iniciada no LABSOLDA há mais de 10 anos e visa, assim como foi no desenvolvimento de fontes de energia para soldagem, criar condições para que o país deixasse de ser somente um espectador no curso dos acontecimentos e passasse a ser um agente com um pouco mais de conteúdo transformador. Nesta sequência de atuação, o presente trabalho utiliza uma versão de processo MIG/MAG que foi concebida no ciclo evolutivo das fontes de energia originárias do LABSOLDA, as quais são continuamente aprimoradas pelo seu fabricante, a empresa IMC. Trata-se da versão CCC - Curto-Circuito Controlado, a qual possui congêneres no mundo, como a STT, CMT, RMD e outras. Estas versões de processo MIG/MAG possuem como atual e principal apelo de utilização a soldagem de raiz. Este apelo está neste trabalho sendo testado e confrontado mediante mais uma ação na tentativa de contribuir no desenvolvimento de tecnologias de equipamentos para soldagem orbital mecanizada de tubos. Foi procurado dar realismo prático mediante o confronto com situações realísticas industriais, como foi o caso de uma espécie de desafio lançado pela PETROBRAS, em que era vislumbrada uma competição para ser verificada a melhor solução para a soldagem orbital de tubos API 5L X70. Entretanto, tanto para este desafio PETROBRAS, como para inúmeros outros casos, não há sempre uma obrigatoriedade de que o passe de raiz seja executado sem a utilização de anteparos (*backings*). Uma das empresas que participou do citado desafio utilizou estes anteparos, produzindo soldas com elevada produtividade. Todavia, o caso aqui considerado neste trabalho pressupôs a não possibilidade de utilização do *backing*. Assim, a versão CCC foi utilizada amplamente, bem como a versão STT da empresa *Lincoln Electric*. Além disso, em razão de informações colhidas internacionalmente de que a versão CMT da empresa *Fronius* produzia bons resultados, a referida versão também foi utilizada como comparação. Na oportunidade, foram realizadas investigações e angariado conhecimento sobre o comportamento e a funcionalidade das versões MIG/MAG e dos manipuladores robóticos de sistemas orbitais mecanizados. Nesse contexto, diferentes formas geométricas de chanfros foram

testadas, como, por exemplo, o chanfro “V” e o chanfro “U”. Para o chanfro “V”, foi evidenciado que o CCC e o STT apresentaram bons resultados com relação à fusão no chanfro, o que não foi constatado com o CMT. Com relação ao chanfro “U”, verificou-se uma melhor condição de aplicação, do ponto de vista de robustez do processo, comparada com o chanfro “V”. Essa constatação foi verificada de maneira que, com o chanfro “U”, é possível realizar a raiz em toda a circunferência do tubo, encostando-se a junta sem aberturas e, mesmo assim, resultar em cordões com penetração total da solda e com boas características geométricas de fusão. As soldas com chanfro “U” foram validadas com a soldagem de vários corpos de prova de tubos da especificação API 5L em diferentes espessuras e diâmetros com as versões CCC e CMT, as quais apresentaram boas características de soldagem. A verificação das variáveis de movimento do manipulador robótico e a verificação da análise de estabilidade da transferência metálica – resultante das variáveis da fonte de energia – foram executadas, de modo a resultar em documentos (EPS – Especificação de Procedimento de Soldagem) que possam garantir a repetibilidade e a confiabilidade dos procedimentos de soldagem desenvolvidos, tornando-os robustos.

Palavras-chave: Passe de Raiz, GMAW, Soldagem Orbital, Procedimento Mecanizado.

ABSTRACT

This paper reports a contribution to the development of technologies and equipment applied to orbital pipe welding. The subject was initiated in LABSOLDA for over 10 years and aims, as it was with the development of power sources for welding, create conditions for the country to cease being only a bystander on the course of events and passed to be an agent with a little more transforming content. In this sequence of action, this study utilizes a MIG/MAG process version that was conceived in the evolutionary cycle of energy sources originated from LABSOLDA, which are continuously enhanced by its manufacturer, the IMC company. It is about the CCC version – Controlled Short Circuiting, which has counterparts in the world, such as STT, CMT, RMD and others. These versions of MIG/MAG processes have as current and main appeal for use the root welding. This appeal in this paper is being tested and confronted by another action in an attempt to contribute to the development of equipment technologies for mechanized orbital pipe welding. It was sought to give practical realism by the confrontation with industrial realistic situations, as was the case of a sort of challenge launched by PETROBRAS, which envisioned a competition in order to be ascertained the best solution for the orbital welding of API 5L X70 pipes. However, both for this PETROBRAS challenge, and for many other cases, there is not always a obligatoriness that the root pass is performed without the use of backings. One of the companies that participated in the aforementioned challenge used these backings, producing welds with high productivity. Nevertheless, the case considered here in this paper assumes no possibility of using the backing. Thus, the CCC version was widely used, as well as the STT version of Lincoln Electric Company. Furthermore, because of internationally collected information that the CMT version of Fronius company produced good results, the said version was also utilized for comparison. At the opportunity, there were carried out investigations and raised knowledge about the behavior and functionality of the versions MIG/MAG and the robotic manipulators of mechanized orbital systems. In this respect, different geometric forms of grooves were tested, such as, for example, the groove "V" and the groove "U". For the groove "V", it was shown that the CCC and the STT

presented good results concerning the fusion on the groove, which was not observed with the CMT. With regard to the groove "U", it was found a better application condition, from the process robustness point of view, compared with the groove "V". This finding was verified in a way that, with the groove "U", it is possible to perform the root around the entire tube circumference, leaning the joint without gaps, and yet, result in beads with full penetration of the weld and with good geometric characteristics of fusion. The welds with the groove "U" were validated by the welding of several test samples of API 5L class tubes of different diameters and thicknesses with the CCC and CMT versions, which showed good welding characteristics. Verification of the movement variables of the robotic manipulator and verification of the stability analysis of the metal transfer – resulting from the power supply variables – were executed so as to result in documents (WPS – Welding Procedure Specification) that can ensure repeatability and reliability of the developed welding procedures, making them robust.

Keywords: Root Pass, GMAW, Orbital Welding, Mechanized Procedure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – a) Içamento de duto terrestre [17]; b) Lançamento de duto subaquático [18]	34
Figura 2 – Abertura de raiz em solda realizada com TIG manual	38
Figura 3 – Comparação de passes de raiz entre curto-circuito com controle de corrente (esquerda), TIG (centro) e MIG/MAG convencional (direita) [35]	40
Figura 4 - Esquema da transferência metálica por curto-circuito convencional acompanhada pelos oscilogramas de corrente e tensão versus tempo – Tc: tempo em curto – Ta: tempo em arco [46]	44
Figura 5 - Forma de onda da versão CCC do fabricante IMC, programa sinérgico C25, arame 1,2 mm.....	45
Figura 6 - Forma de onda da versão STT do fabricante Lincoln Electric, programa sinérgico STT - Steel 1,2 mm Ar CO2	45
Figura 7 - Imagens reais da transferência metálica do sistema CCC da empresa IMC-Soldagem	46
Figura 8 - Principais fases da versão CMT [48]	47
Figura 9 - Forma de onda da versão CMT do fabricante Fronius, programa sinérgico G3Si, arame 1,2 mm	47
Figura 10 - Cordão com tendência de escorrimento para o lado esquerdo; b) Cordões de acabamento sobrepostos	51
Figura 11 - a) Detalhes do chanfro em V modificado; b) Sequência de passes.....	51
Figura 12 - Falta de fusão e variação de gap em cordão de raiz. 52	
Figura 13 - Tochas: 1 - <i>Narrow Gap</i> SPA; 2 - Aletada SPA; 3 - Tocha MIG/MAG Comum	53
Figura 14 – Descontinuidades e defeitos; a) Posição PV – 3h; b) Posição PV – 9h.....	54
Figura 15 - Sistema de soldagem orbital Magnatech – adaptado de [52].....	56
Figura 16 - Forma de onda da versão CCC [56].....	61
Figura 17 – Sequência de regulagem do sinérgico CCC na fonte Digiplus A7	62
Figura 18 - Desenho esquemático de chanfro em “V” usado em tubos	66
Figura 19 - Manipulador robótico Tartilope V3	66
Figura 20 – Diagrama de posições de soldagem para tubos [58] 68	
Figura 21 - Medições da raiz em chanfro	70

Figura 22 – 1) Chanfradeira/Biseladora; 2) Unidade Hidráulica; 3) <i>ID Tracker</i>	71
Figura 23 - a) Bisel em J padrão na soldagem dos ensaios; b) Montagem chanfro U [28].....	72
Figura 24 - Bancada de Ensaios: 1 - Fonte de energia; 2 - Cabeçote alimentador de arame; 3 - Tubo; 4 - Trilho do manipulador; 5 - Manipulador da tocha; 6 - Unidade de controle do manipulador; 7 - IHM; 8 – SAP.....	72
Figura 25 - Bancada de ensaios para verificação de movimentos do Tartilope V3.....	76
Figura 26 - Imagem <i>Motion Studio</i> ; 1- Eixo y Tartilope V3; 2- Sensor de deslocamento linear; 3- Adesivo de referência.....	78
Figura 27 - Imagem Osciloscópio - a) Cursores posicionados na amplitude; b) Cursores posicionados na base de tempo.....	80
Figura 28 - Gráficos de verificação do Tartilope V3 – relação amplitude de tecimento versus posição de soldagem no tubo.....	84
Figura 29 - Gráfico do método da velocidade de soldagem.....	85
Figura 30 – Comportamento da variação de V_a pela alteração da DBCP - versão CMT [36].....	88
Figura 31 - Gráfico da relação da variação de V_a pela alteração da DBCP - versão CMT.....	89
Figura 32 - Gráfico de V_a registrada por transdutor	89
Figura 33 - Gráfico da relação da variação de I_m pela alteração da DBCP – versão CCC.....	90
Figura 34 - Cordão de raiz em ensaio de validação do chanfro V - (a) CCC; (b) STT; (c) CMT	91
Figura 35 - Macrografias a) CCC - PP, PV, SC respectivamente b) STT - PP, PV, SC respectivamente c) CMT - PP, PV, SC respectivamente.....	92
Figura 36 – Porcentagem da análise do tempo em curto em relação ao período total.....	95
Figura 37 - a) Falta de fusão na raiz - U-CP 01, posição SC-5h; b) Perfuração na raiz – U-CP 02, posição SC-5h.....	98
Figura 38 – Soldas com versão CCC em tubos de 18” – U-CP 04; U-CP 05; U-CP 06.....	99
Figura 39 - U-CP 07 - Região de Instabilidade.....	100
Figura 40 - Gráficos U-CP07 - Região de instabilidade	101
Figura 41 - Soldas com versão CCC – U-CP 08; U-CP 09; U-CP 10	102
Figura 42 - Macrografias CCC: a) U-CP 05; b) U-CP 06; c) U-CP 07	103

Figura 43 - Macrografias CCC com desalinhamento proposital nos tubos.....	105
Figura 44 - Gráficos dos dados adquiridos com SAP – CCC – Chanfro “U” – Tubo de 18”.....	106
Figura 45 – Gráficos sobrepostos de tensão e corrente CMT-Chanfro U para cada regulagem de CA.....	108
Figura 46 - Soldas em tubos com a versão CMT.....	109
Figura 47 - Macrografias CMT - Tubo 18" - a) CMT-U-CP 03; b) CMT-U-CP 04; c) CMT-U-CP 05	110
Figura 48 - Gráfico de dados adquiridos com o SAP - Versão CMT – Tubo 18”	112
Figura 49 – Detalhe do bico de contato dentro do chanfro U...	113
Figura 50 - Soldas em tubos de 22” com a versão CCC.....	114
Figura 51 - Macrografias CCC - Tubo 22" - a) U-CP 12; b) U-CP 14.....	115
Figura 52 - Gráficos CCC - Tubo 22" – Chanfro “U”	117
Figura 53 - Soldas em tubos de 16” com a versão CCC.....	118
Figura 54 - Macrografias CCC - a) U-CP 16; b) U-CP 17	119
Figura 55 - Gráfico dados CCC - tubo 16” – Chanfro “U”.....	120
Figura 56 - Soldas em tubos de 18” - versão CCC – Va 4,4 m/min	121
Figura 57 - Macrografias CCC com Va 4,4 m/min- a) U-CP 18; b) U-CP 19.....	122
Figura 58 – Macrografias CMT - Tubo 18" - a) CMT-U-CP 03; b) CMT-U-CP 04; c) CMT-U-CP 05	123
Figura 59 – Comparativo das aquisições com SAP.....	124
Figura 60 - Evolução dos trilhos orbital; Sistema ágil de acoplamento no tubo.....	126
Figura 61 - Tochas de soldagem: tocha reta; tocha <i>Narrow Gap</i> SPA; tocha aletada SPA; tocha compacta desenvolvida no LABSOLDA; respectivamente da esquerda para direita.....	128
Figura 62 – (a) Suporte de tocha; (b) regulagem do ângulo de ataque; (c) regulagem do ângulo de trabalho.....	128
Figura 63 - Acopladeira interna de tubos	129
Figura 64 - Bancada de soldagem orbital	130
Figura 65 - Nova concepção de sistema orbital LABSOLDA..	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Critérios Normalizados. Adaptado de [39] [40] [41]	42
Tabela 2 – Variáveis de procedimento em chanfro U	96
Tabela 3 – Valores de entrada IHM – Tartilope V3 parado	76
Tabela 4 - Valores de entrada IHM – Tartilope V3 em movimento	77
Tabela 5 - Dados de entrada para método da Vs	77
Tabela 6 – Valores obtidos pelo método da filmagem (análise gráfica) com Tartilope V3 parado.....	81
Tabela 7 – Valores obtidos pelo método do sensor de deslocamento (análise gráfica) com Tartilope V3 parado	81
Tabela 8 – Valores obtidos pelo método de imagem do osciloscópio com Tartilope V3 parado.....	82
Tabela 9 – Valores obtidos pelo método do sensor de deslocamento com Tartilope V3 deslocando a Vs = 28 cm/min	83
Tabela 10 – Valores obtidos pelo método de imagem do osciloscópio com Tartilope V3 deslocando a Vs = 28 cm/min ..	83
Tabela 11 - Valores chanfro V	93
Tabela 12 - Chanfro V – Dados aquisitados com SAP.....	93
Tabela 13 - Valores das medições na raiz com CCC - Chanfro U – Tubo 18” – espessura 7/16”.....	104
Tabela 14 – Valores das medições na raiz com CCC - Tubos com desalinhamento - Chanfro U – Tubo 18” – espessura 7/16”.....	106
Tabela 15 – Valores de raiz com CMT - Chanfro U - Tubo 18” – espessura 7/16”	111
Tabela 16 - Valores de raiz com CCC - Chanfro U - Tubo 22” – espessura 1 ¼”	116
Tabela 17 - Valores de raiz com CCC - Chanfro U - Tubo 16” – espessura ½”	120
Tabela 18 - Valores de raiz com CCC - Chanfro U - Tubo 18” – espessura 7/16” – Va 4,4 m/min.....	124

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

“a” – Variável utilizada para alterar a energia de soldagem com CCC
API 1104 – *Welding of Pipelines and Related Facilities*
Ar – Argônio
ASME B 31.3 – *Pressure Piping*
ASME B 31.4 – *Pipeline Transportation Systems for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids*
ASME B 31.8 – *Gas Transmission and Distribution Piping Systems*
At – Amplitude de tecimento
av – avanço do arame
C25 – Mistura de gás de proteção (75% AR + 25% CO₂)
CA – Correção do Arco no CMT
CCC – Curto-Circuito Controlado
Ckr – Variável de detecção de reabertura de arco no CCC
CMT – *Cold Metal Transfer*
CO₂ – Dióxido de Carbono
CP – Corpo de Prova
Cta – Variável atuante sobre o tempo de Ia1 no CCC
DBCP – Distância Bico de Contato Peça
EPS – Especificação do Procedimento de Soldagem
f – Frequência
ff – Falta de Fusão
Ia1 – Corrente de pulso do CCC
Ia2 – Corrente de patamar intermediário do CCC
Ia3 – Corrente de base do CCC
ib – corrente de base
ic – instante de contato
Ic3 – Início da subida de corrente de estrangulamento da gota do CCC
IHM – Interface Homem Máquina
Im – Corrente Média
ip – pulso de corrente
ISO 5817 – *Welding – Fusion Welded Joints in Steel – Quality Levels for Imperfections*
LABSOLDA – Laboratório de Soldagem da Universidade Federal de Santa Catarina
MIG/MAG – *Metal Inert Gas / Metal Active Gas*
NGW – *Narrow Gap Welding*

Ni – Níquel
pc – pico de corrente
PP – Posição Plana
PV – Posição Vertical Descendente
ra – reabertura de arco
re – recuo do arame
SAP – Sistema de Aquisição Portátil
SC – Posição Sobrecabeça
STT – *Surface Tension Transfer*
TIG – *Tungsten Inert Gas*
tp – Tempo de parada
U – CP – Corpo de prova para validação em chanfro U
Um – Tensão Média
UT – CP – Corpo de prova de teste em chanfro U
Va – Velocidade de Alimentação de Arame
Vs – Velocidade de Soldagem

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	OBJETIVOS	31
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	33
2.1	SOLDAGEM EM TUBOS	33
2.2	SOLDAGEM DO PASSE DE RAIZ.....	36
2.3	VERSÕES MIG/MAG COM TRANSFERÊNCIA POR CURTO-CIRCUITO COM CONTROLE DE CORRENTE.....	43
3	ANTECEDENTES	49
3.1	DESAFIO PETROBRAS	49
3.2	EQUIPAMENTOS DE SOLDAGEM ORBITAL.....	55
3.3	DESENVOLVIMENTO CCC	59
3.3.1	Regulagem do sinérgico CCC	62
4	MATERIAIS E MÉTODOS PARA ENSAIOS DE SOLDAGEM.....	65
4.1	SOLDAGEM EM CHANFRO “V”	65
4.1.1	Materiais e equipamentos	65
4.1.2	Metodologia.....	67
4.2	SOLDAGEM EM CHANFRO “U”	70
4.2.1	Materiais e equipamentos	70
4.2.2	Metodologia.....	73
5	VERIFICAÇÃO DE MOVIMENTO TARTÍLOPE V375	
5.1	METODOLOGIA DE VERIFICAÇÃO	75
5.1.1	Método da filmagem	77
5.1.2	Método de análise com sensor de deslocamento e método de imagem do osciloscópio.....	78
5.2	RESULTADOS DAS VERIFICAÇÕES DA MOVIMENTAÇÃO DO TARTÍLOPE V3.....	80

6	RESULTADOS E DISCUSSÕES DOS ENSAIOS DE SOLDAGEM	87
6.1	RAIZ EM CHANFRO “V”	87
6.1.1	Análise do procedimento	87
6.1.2	Análise das soldas.....	91
6.2	RAIZ EM CHANFRO “U”	95
6.2.1	Avaliação do procedimento – CCC – Tubo 18”.....	95
6.2.2	Análise das soldas CCC – Tubo de 18”	102
6.2.3	Avaliação do procedimento CMT Tubo 18”.....	107
6.2.4	Avaliação das soldas – CMT – Tubo 18”	109
6.3	VALIDAÇÃO DE PROCEDIMENTO EM TUBOS DE DIFERENTES DIÂMETROS E ESPESSURAS	112
6.3.1	Tubos de 22”	112
6.3.2	Tubos de 16”	118
6.4	RESULTADOS COMPARATIVOS ENTRE CMT E CCC PARA CHANFRO “U”	121
7	DESENVOLVIMENTO E MELHORIA DE EQUIPAMENTOS	125
8	CONCLUSÕES	133
9	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	137

1 INTRODUÇÃO

No cenário mundial, a indústria da exploração e produção de petróleo e gás natural é um importante ramo da economia. No entanto, analistas do setor em vários continentes afirmam que, após um período de bons negócios a realidade atual é bem diferente. O momento está fazendo as empresas reavaliarem seus investimentos devido à queda vertiginosa dos preços desses produtos [1]. Essa realidade não afeta apenas as empresas, mas também pode influenciar as relações geopolíticas, nas quais o petróleo sempre se destacou, de uma forma ou de outra, no centro das negociações entre os países.

Dentro desse panorama problemático e repleto de incertezas, muitas empresas internacionais estão buscando diminuir os custos de produção, investindo em tecnologia e inovação. Nos EUA, segundo consultoria americana especialista em petróleo e gás, novas tecnologias serão responsáveis pela redução em até 60% dos custos que a atividade possui nos dias de hoje [1]. No cenário brasileiro, após a descoberta do pré-sal em 2006 ter registrado 1/3 das descobertas de petróleo e gás em âmbito mundial [1], a indústria desse segmento recebe apenas 6% do investimento global do setor [2]. De acordo com consultoria realizada no Brasil pela empresa americana *Wood Mackenzie*, esse reflexo de baixo investimento que acaba prejudicando a competitividade e contendo o seu desenvolvimento, é motivado principalmente por problemas como a corrupção e alto intervencionismo estatal [1].

Em meio a essa conturbada situação, a tecnologia e a inovação destacam-se como oportunidades de desenvolvimento, ajudando a produção petrolífera a ser mais eficiente e produtiva. Uma das áreas que tem uma enorme relevância econômica é o escoamento da produção. Além de elevados custos, sistemas de escoamento por meio de transporte como navios petroleiros, terminais marítimos e transporte terrestre apresentam elevadas dificuldades operacionais e acentuado impacto ambiental. Uma alternativa é o escoamento por meio de dutos, sistema operado pelo Brasil com uma malha de mais de 7500 km de oleodutos [3] e mais de 7100 km de gasodutos espalhados no território nacional [4]. Entretanto, esses valores tornam-se muito pequenos comparados a países como os EUA, onde o escoamento conta com mais de 89 mil km para petróleo e mais de 153 mil km para

os derivados, operando a um custo 36% menor que no Brasil [5]. Em painel realizado na conferência Rio Pipeline 2015, Oswaldo Pedrosa [6], presidente da Pré-Sal Petróleo SA (PPSA), apresentou estimativas sobre o crescimento e o impacto no setor dutoviário. Por ser um mercado estratégico para o país, logo vai demandar alto investimento em tecnologia e ampliação da atual malha, que deve chegar a mais de 6 mil km de extensão [6]. Estudos do Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (IBP), em parceria com o Instituto Ilos, estimam que até 2025 a malha de dutos brasileiros demande US\$ 4 bilhões apenas em infraestrutura nova, sem contar com investimentos em manutenção da rede atual [2].

Em atividades de construção, montagem, reparo e manutenção das linhas dutoviárias, a soldagem é o principal processo de fabricação utilizado, assegurando integridade estrutural das juntas. Desta forma, processos e procedimentos de soldagem mais produtivos influenciam diretamente nos custos, cronogramas, análise de riscos e viabilização de projetos.

Praticamente de forma integral em todo o Brasil, a soldagem de tubos é realizada com procedimentos manuais. Tem-se a dependência da formação dos soldadores disponíveis que estabelecem o processo e a forma de execução, ficando engenheiros e inspetores submissos a essas condições e tornando-se apenas meros acompanhadores do trabalho. Somando-se aos fatores acima mencionados, as especificações de procedimentos de soldagem (EPS), as ferramentas e as metodologias de controle são normalmente elaboradas e usadas de forma antieconômica, com base na premissa de que “sempre foi feito assim”. É difícil a quebra de paradigma nesse meio, devido à condição de que mesmo procedimentos de menor produtividade conseguem atender às condições exigidas em normas técnicas. Para que uma mudança ocorra, exigir-se-ia uma enorme força de vontade, principalmente de engenheiros, inspetores e empresas do ramo da soldagem, tirando-os hoje de uma “zona de conforto”.

Tratando-se das EPS utilizadas atualmente em procedimentos manuais, a maioria dos documentos não conduzem, em princípio, à otimização de procedimentos, a qual visa à um melhor nível de reprodutibilidade e melhores condições de produtividade. Essas EPS apresentam faixas de valores muito amplas para variáveis de soldagem, o que suportaria qualquer tipo de mão de obra. Isso, de fato, não restringe as condições

operacionais do soldador, o qual pode realizar o procedimento da maneira que julgar mais confortável à sua conjuntura. Entretanto, na tentativa da aplicação em sistemas mecanizados, a faixa de valores das variáveis não é funcional justamente pela dificuldade desses sistemas em reproduzir o movimento humano. Ficaria inviabilizado um sistema com uma série de sensores que repetisse a realimentação dada, do ponto de vista manual, pelos órgãos sensoriais do soldador. Um procedimento para ser utilizado em sistemas mecanizados deve ser muito bem estudado, a ponto de deixá-lo robusto o suficiente para o atendimento da aplicação estabelecida.

A habilidade e a percepção dos soldadores no controle da poça de fusão é um grande diferencial para a execução de uma solda aceitável, sendo esses indivíduos verdadeiros artistas no desenho final do metal solidificado. Ao longo dos anos, a falta de profissionais qualificados, a dificuldade de treinamento, além do fato que a inovação é uma das principais fontes de diferenciação e sucesso competitivo na maioria das indústrias, todos esses fatores instigam empresas internacionais do ramo da soldagem a atuarem no desenvolvimento tecnológico para a mecanização nos equipamentos e procedimentos.

Tipicamente, a soldagem de tubos é realizada com um passe de raiz com processo TIG (*Tungsten Inert Gas*) e preenchimento com soldagem por eletrodo revestido, ambos realizados de forma manual [7]. Já em alguns casos, dependendo da disponibilidade e a qualificação dos soldadores, a raiz também é executada com eletrodos revestidos, preferencialmente do tipo celulósico, que atribui maior potencial de fusão ao metal de base em relação aos outros tipos de eletrodos, tornando-se menos vulnerável a deixar defeitos como falta de fusão. Processos como TIG, são bem aceitos na operacionalidade manual em razão da vantagem da controlabilidade da poça de fusão, beneficiando o soldador na correção de possíveis desalinhamentos e imperfeições na montagem das juntas. Em contraste, a grande desvantagem desses processos manuais está atrelada a produtividade. Neste cenário, o processo MIG/MAG torna-se cada vez mais atrativo, visto seu maior potencial produtivo, elevado fator de trabalho, altas taxas de deposição, flexibilidade e facilidade na mecanização e automação, mantendo-se assim a qualidade requerida em diversas aplicações [8].

Na construção de dutos, a execução do passe de raiz é o mais crítico e suscetível a falhas. Há uma linha tênue entre energia suficiente para garantir fusão completa com a energia máxima para evitar a ocorrência de perfuração. A qualidade da raiz é parte fundamental quanto à segurança, e de forma geral para montagens de dutos, a execução da mesma controla a velocidade na construção da linha, ditando o ritmo da obra. Muitas aplicações em campo geralmente se utilizam de anteparo para sustentação da poça (*backing*), adaptado em dispositivos de alinhamento interno (acopladeira). A maioria é composta de backing de cobre, o que não é admitido por parte de empreiteiras, europeias principalmente, devido à contaminação no cordão de solda que a inclusão de cobre poderia gerar [9].

Nesse contexto, o ideal é a realização da raiz sem a utilização de *backing*, aliado à vantagem da mecanização. No entanto, grande parte das complicações para a sua realização são as diferenças de desalinhamento entre os tubos, a variação de abertura de raiz e diferença de espessuras no nariz usinado. Além dos fatores mencionados, a principal dificuldade relacionada na soldagem de tubos está ligada à operacionalidade do procedimento, devido às diferentes posições de soldagem, onde efeitos de forças gravitacionais interferem na fluidez da poça e solidificação do cordão. Ao participar do “Desafio Petrobras de Soldagem Orbital Mecanizada”, que será mais bem detalhado no decorrer do trabalho, foram realizados procedimentos de soldagem em tubos com 22” de diâmetro e espessura de 1 ¼”. Embora o desafio não restringisse o uso do *backing*, optou-se neste trabalho em fazer a raiz sem o uso do anteparo. Com isso, dificuldades na realização de uma raiz íntegra em toda circunferência do tubo – o que ocasionou defeitos como falta de penetração, falta de fusão e porosidade no cordão – foram atribuídas às problemáticas citadas anteriormente neste parágrafo, além das dificuldades de acessibilidade na junta, aquecimentos de cabos, tochas e conduítes, dificuldades de alimentação do arame, uso de consumíveis de solda como bicos de contato, bocais e difusores inadequados.

Ainda que o processo MIG/MAG seja uma opção favorável quanto à produtividade na execução do passe de raiz, a versão curto-circuito convencional com comando em tensão é um fator limitante, porque não atua diretamente na corrente, que é a variável de influência determinante para a solda. A atuação

indireta restringe determinados objetivos, dificultando o controle do passe de raiz no fundo dos chanfros, devido à variação da corrente média quando a tocha se desloca lateralmente à junta, ou tem-se a variação da distância bico de contato peça (DBCP) [10]. Quando isso acontece, há também uma forte tendência do arco ancorar em regiões onde favorece a passagem da corrente, podendo gerar desvios do arco principalmente por características geométricas irregulares da junta. Outro fato problemático que envolve o uso da versão curto circuito convencional MIG/MAG, é devido a uma regulagem errônea das variáveis elétricas - tensão e indutâncias - concatenado com a velocidade de alimentação de arame (V_a), o que gera uma transferência metálica com excesso de respingos. Esses respingos acabam solidificando-se na região do chanfro, gerando a necessidade de uma operação de remoção, impactando diretamente no tempo final da operação de soldagem.

Uma alternativa para a minimização das problemáticas da versão com curto-circuito convencional MIG/MAG, e muito utilizado em várias aplicações de construção de linhas de tubos no mundo, é o uso de versões MIG/MAG em curto-circuito com controle de corrente. A tecnologia de controle da corrente permite um nível de controle da poça de fusão que oferece melhorias no seu uso para o passe de raiz [11]. Algumas empresas de tecnologia de soldagem disponibilizam no mercado suas respectivas versões, cada uma com características particulares. Alguns exemplos como as versões internacionais STT (*Surface Tension Transfer*) da empresa *Lincoln Electric* e CMT (*Cold Metal Transfer*) da empresa *Fronius* e a única tecnologia nacional CCC (Curto-Circuito Controlado) da empresa IMC Soldagem.

Com a necessidade da redução dos custos operacionais no escoamento de petróleo e gás, são requeridos aumentos dos diâmetros dos tubos e a elevação da pressão de operação, o que demanda a maximização da relação diâmetro/espessura [12]. Esses requisitos estão se tornando cada vez mais severos, uma vez que a demanda energética mundial requer a exploração de jazidas petrolíferas em locais cada vez mais inóspitos e sob condições operacionais crescentemente severas [13]. Com isso tornam-se primordiais procedimentos de soldagem que atendam tanto os requisitos de raiz, quanto ao preenchimento e acabamento com elevada integridade e isenção de defeitos.

Na busca incessante pelo aumento da produtividade, indústrias na área da soldagem de dutos ao redor do mundo têm

investido em sistemas mecanizados. A viabilidade econômica de soldas orbitais mecanizadas depende de chanfros com volumes menores. Uma tendência nesse caso é o uso das chamadas juntas *Narrow Gap*, as quais possuem uma abertura pequena em um tubo de parede espessa. De acordo com Malin [14], a técnica NGW (*Narrow Gap Welding*), traz algumas vantagens como redução no tempo de soldagem, menor custo com consumíveis, redução no custo de operação, redução na distorção angular. No entanto, as grandes dificuldades da referida técnica estão associadas com a alta sensibilidade na formação de defeitos tais como falta de fusão, formação de poros devido à dificuldade na proteção gasosa e principalmente na operação quanto à acessibilidade da tocha no interior da junta.

No que tange a aplicação nacional de soldagem orbital, a inserção e a propagação de informações neste ramo, muitas vezes especificados em documentos internos de empresas de longa data sem revisões, acabam sendo barreiras para o desenvolvimento e inovações tecnológicas. As empresas acabam criando um círculo de credices que levam a várias gerações sempre realizar procedimentos de soldagem da mesma maneira sem inovação. O crescimento de tecnologias que envolvem a soldagem é de fundamental importância para o desenvolvimento, visto que no Brasil não há disponibilidade de equipamentos orbitais nacionais, ficando-se inteiramente na dependência de entidades estrangeiras. As principais novidades são trazidas por empresas, oriundas de grandes multinacionais com atuação global. Essas multinacionais mantêm seus setores de pesquisa e desenvolvimento em seus países de origem, o que inibe e prejudica ações de desenvolvimento tecnológico nacional [15], devido ao elevado custo e à falta de incentivo.

Em razão da necessidade do parque industrial brasileiro atuar na mecanização e automação de processos de soldagem em linhas de fabricação, o laboratório de soldagem da Universidade Federal de Santa Catarina (LABSOLDA) vem incessantemente trabalhando na busca e desenvolvimento da inovação tecnológica, junto à formação de conhecimento e pessoal especializado. Além de equipamentos, como sistemas orbitais mecanizados, atua intrinsecamente no desenvolvimento de versões de processos e procedimentos para soldagem de tubos. Essas versões e procedimentos devem atender aos requisitos de qualidade,

integridade, robustez, repetibilidade, tornando-se assim produtivos e competitivos.

1.1 OBJETIVOS

Dentro dos contextos apresentados, este trabalho visa atuar no conhecimento e no desenvolvimento de tecnologias e técnicas operacionais da soldagem orbital mecanizada com versões de processos MIG/MAG. Incluídos nessas tecnologias, além das fontes de soldagem com suas respectivas versões em curto-circuito com controle de corrente, estão também os equipamentos que fornecem condições de movimentação à tocha de soldagem no deslocamento orbital do tubo. Como exercício para o atendimento do objetivo proposto, uma solução de raiz em uma junta mais produtiva será factível de ser apresentada, aplicando-a em tubos de grande porte, tubos estes utilizados na indústria de petróleo e gás natural.

O conhecimento dos equipamentos e a verificação de aspectos operacionais foram estabelecidos como objetivos para a soldagem de tubos com diferentes equipamentos orbitais mecanizados, no intuito de pesquisar os benefícios de cada sistema, desde a forma construtiva, mecanismos de fixação, possibilidades de integração das variáveis de soldagem e a visão do operador com a facilidade de manuseio. Paralelo a essa investigação operacional, intenta-se também, a partir de investigações geradas no decorrer dos ensaios, subsidiar com informações a equipe de projeto do LABSOLDA, com o propósito de melhoria tecnológica contínua e atuação nas causas primárias das problemáticas dos equipamentos desenvolvidos.

Ainda que, mundialmente, na maior parte das vezes, a soldagem de raiz seja feita de maneira manual, mesmo com o uso de versões MIG/MAG com controle de corrente, o objetivo deste trabalho é fazer a soldagem de raiz sem a utilização de *backing*, com procedimento inteiramente mecanizado e que atenda aos critérios de aceitação de normas aplicáveis à construção de dutos. Para isso faz-se necessário recorrer à investigação de diferentes formas construtivas de chanfro, como o clássico chanfro “V” e o chanfro “U”. Nesse contexto, versões de processo MIG/MAG por transferência em curto-circuito com controle de corrente, como CCC, CMT e STT são descritos como os mais indicados. O intuito é conhecer e investigar essas versões, avaliando os dados

elétricos e os perfis geométricos de fusão dos cordões realizados em cada tipo de chanfro. Outros requisitos a serem abordados são a verificação das limitações na execução do passe de raiz e a identificação de melhores opções no desenvolvimento de um procedimento robusto e de qualidade em tubos de diferentes diâmetros e espessuras.

Para versões de processos MIG/MAG em curto-circuito com controle de corrente, o desenvolvimento de conhecimentos não está baseado apenas em equipamentos comerciais, como o STT e CMT, os quais não oferecem a possibilidade de se inferir o âmago da tecnologia, mas está baseado no CCC. Por ser uma tecnologia interna e aberta, é possível contribuir para o seu desenvolvimento, sugerindo e realizando melhorias em termos de desempenho e regulagens aplicadas ao passe de raiz em tubos – situação real para a qual a versão CCC foi desenvolvida. A robustez de uma aplicação é a forma de se concretizar o sucesso de um trabalho, o qual vem sendo realizado por vários pesquisadores ao longo da história do laboratório.

Por fim, para o fechamento do conjunto de objetivos e atendimento aos requisitos de mecanização da soldagem orbital para o passe de raiz, será desenvolvida a elaboração de especificações de procedimentos de soldagem (EPS). Informar-se-ão, assim, faixas de valores mais restritas para as variáveis de soldagem e variáveis de movimento do manipulador robótico, equipamentos utilizados, consumíveis e detalhes operacionais, que assegurem robustez, maior qualidade e melhor desempenho na soldagem dos tubos aplicados ao escoamento de petróleo e gás.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SOLDAGEM EM TUBOS

Embora formas diferenciadas de fontes de energias renováveis estejam surgindo com grande expansão, a indústria de petróleo e gás faz-se ainda imprescindível no atual cenário econômico-industrial do país. Formas diretas e indiretas de industrialização dependem desse consumo, e em meio a crescente necessidade, é cada vez maior a exigência por métodos mais eficazes no transporte desse produto. Inserido nesse contexto, constata-se também forte aumento dos gargalos no escoamento para o abastecimento de combustíveis no mercado, e com isso grande preocupação na falta de investimentos nesses setores.

Tratando-se de produtos com alto risco de contaminação, o petróleo e o gás podem provocar graves danos ao meio ambiente, quando entram em contato com águas de oceanos, mares, rios e reservas, ou com a superfície do solo. Esses acidentes, que não são novidades, vêm ocorrendo nas últimas décadas principalmente em plataformas e navios cargueiros, gerando consequências drásticas que afetam consideravelmente os ecossistemas.

Uma solução plausível para solucionar as situações apresentadas é o investimento em meios mais produtivos e seguros no escoamento do petróleo e gás. Já há alguns anos, países produtores têm realizado grandes investimentos em dutos, com resultados expressivos, o que deveria ser uma solução também aqui no Brasil. No entanto, a falta de planejamento e estratégias, somados ao conjunto de problemáticas que envolvem as pessoas técnicas envolvidas com esse setor, freiam os investimentos ficando o país suscetível a uma produção com custo elevado e com baixa competitividade, o que onera seus produtos e derivados e limita o consumo e a produção industrial.

Isto é ruim, visto pelo fato que no Brasil há uma grande demanda pela construção de dutos, para a qual o desenvolvimento e a aplicação de novas tecnologias de soldagem tornam-se fundamentais, por ser a soldagem um dos seus principais processos de fabricação, ditando, normalmente assim, o ritmo da obra.

A construção e montagem de dutos podem ser realizadas em meio terrestre, conhecida como *onshore*, e também para os

meios subaquáticos, conhecido como *offshore*. A Figura 1 mostra a aplicação. Várias são as etapas de montagem e despendimento de um amplo conjunto de equipamentos e pessoas para a conclusão do empreendimento [16].



a) **Figura 1 – a) Içamento de duto terrestre [17]; b) Lançamento de duto subaquático [18]**

Para a realização da soldagem de tubos, alguns processos de soldagem são aplicados, o processo a arco por eletrodo revestido; TIG; MIG/MAG; arco submerso, quando então o tubo é “rotacionado”; e aplicação de soldagem a laser, processo este em desenvolvimento em alguns laboratórios [19].

A maioria das aplicações no Brasil é realizada de forma manual, utilizando-se de processos de baixa produtividade, como o eletrodo revestido e o TIG.

No que tange o eletrodo revestido, a baixa produtividade está relacionada principalmente às paradas para troca de eletrodo, limpeza e remoção de escória, e preparação da unha (adoçamento na transição do cordão). A qualidade das soldas é diretamente dependente da habilidade do soldador, fator preocupante dado à escassez desse profissional qualificado no mercado [7].

No caso da soldagem TIG, que é um processo de grande utilização para o passe de raiz por ser considerado de alta qualidade e baixo índice de defeitos, porém, considerado de baixa produtividade devido à velocidade na soldagem manual. Em contrapartida, há opções de aumento da produtividade com as novas tendências de soldagem TIG, com a aplicação de alimentação automática de arame e realização da solda de forma mecanizada.

Entretanto, a tendência mundial no setor dutoviário é a utilização do processo de soldagem MIG/MAG, onde muitas aplicações são realizadas de forma manual. Vários relatos em revistas, contudo, apontam a soldagem mecanizada como o principal meio aplicado a esse processo de soldagem, com resultados surpreendentes e enfatizando a produtividade com a redução do tempo de soldagem [20] [21] [22]. Outros autores ressaltam a utilização do processo MIG/MAG com eletrodo tubular mecanizado na aplicação de preenchimento e acabamento de juntas [7] [23] [24].

Uma das vantagens citadas na mecanização é a capacidade de repetibilidade de movimento e precisão da tocha de soldagem com as variáveis de oscilação. Porém, a maioria de sistemas mecanizados requer um operador, que interfere de forma remota nas variações que surgem na soldagem. Outros métodos de controle são por meio de detecções feitas por sensores que realizam as correções [25], por meio de sistemas realimentados.

O principal desafio na soldagem orbital é constituído pela necessidade de sustentar a poça de fusão em posições que desafiam a gravidade e, por isso, há a necessidade de estratégias muito bem concebidas a fim de que a poça metálica se sustente no espaço. Portanto, a energia de soldagem tem de se situar em uma determinada faixa de valores específicos.

Outras problemáticas são evidenciadas, tanto na preparação e na montagem da junta, quanto na realização do procedimento, o que influi em seu resultado final.

Principalmente para a mecanização, na qual há menor margem para não conformidades na montagem dos tubos e na regulagem de variáveis de soldagem, as problemáticas aparecem inicialmente na fabricação e no cuidado no transporte dos tubos, que muitas vezes chegam amassados ao canteiro de obras e com imperfeições geométricas.

As condições de soldagem em campo são severas, com regime de trabalho intenso, e onde os equipamentos entram em contato direto com poeira e/ou umidade do ambiente e limalhas de aço em decorrência da preparação e reparos nos tubos. Com relação à usinagem dos chanfros, a falta de máquinas específicas para a operação pode resultar em preparações que não atendam à precisão dimensional adequada. O investimento nesses equipamentos é alto e, por isso, diversas empresas acabam ficando submissas a condições de preparação manual – o que

pode resultar em desalinhamentos entre tubos, variações de abertura de raiz na montagem, variações nos ângulos do chanfro, comprometendo assim a robustez da solda em muitas operações.

De fato, o investimento da indústria da soldagem no desenvolvimento de equipamentos, processos e procedimentos mais confiáveis, fazem diminuir a suscetibilidade do aparecimento de descontinuidades e defeitos, reduzindo os retrabalhos. Retrabalho esse, que é considerado uma das principais adversidades quando se fala em produtividade.

2.2 SOLDAGEM DO PASSE DE RAIZ

Após a preparação e a montagem da junta, a soldagem da raiz é próxima etapa da obra. Em sua realização, devido às condições operacionais e tecnológicas das empreiteiras, diferentes processos, procedimentos e metodologias de configurações de chanfros são aplicados.

Dentro desta contextualização, fabricantes fornecem tubos com as extremidades previamente preparadas para montagem com chanfro V. Esse tipo de chanfro é mais aplicado na soldagem manual, devido às condições de montagem com aberturas suficientes e acessíveis da tocha para que o soldador possa conseguir a fusão completa em ambos os lados do bisel [26], gerando penetração total.

Em outras situações, empresas possuem em sua estrutura máquinas para a preparação de geometrias de chanfros diferenciadas, como bisel em J, formando montagens em chanfro U, ou até mesmo chanfros idealizados, específicos no fornecimento de condições mais favoráveis à soldagem mecanizada.

Em relação a processos manuais, o que dita muitas vezes como será feita a soldagem de raiz é a qualificação que o soldador possui e/ou o processo que esse profissional consegue realizar.

Um dos processos mais comuns em raiz de tubos é o eletrodo revestido. Muitos ainda o preconizam, devido a fatores ligados à tradição, à simplicidade, ao custo baixo de equipamentos, à versatilidade de produtos e à possibilidade de soldagem em ambientes abertos. A maioria das aplicações de raiz com esse processo é feita com eletrodos da classe celulósica. O elevado teor de hidrogênio, que consequente gera o efeito de uma

maior potência fornecida ao metal de base pela queima desse revestimento, e a característica de pouco volume e rápida solidificação da escória são considerados como principais vantagens para o uso desse eletrodo, permitindo uma melhor visualização do soldador que realiza esse procedimento normalmente na progressão descendente [16].

Além dos fatos mencionados, o processo por eletrodo revestido requer forte habilidade do soldador, que age com destreza ao movimento da poça e às variações que possam vir a surgir na junta. No entanto, o uso desse processo incorre em muitas desvantagens, como já mencionado na seção 2.1.

Outro processo manual muito empregado em raiz de tubos é o TIG. Um exemplo de sua utilização foi o acompanhamento de um trabalho por profissionais do LABSOLDA [27], onde pôde ser verificada a construção de linha de “mineroduto” para empresa do segmento. Na aplicação, utilizou-se o sistema mecanizado no preenchimento da junta. Já para a soldagem da raiz foi executada por soldadores da empresa com TIG manual. Uma observação importante a ser feita é a grande abertura da raiz registrada, para facilitar a acessibilidade da tocha, como mostra a Figura 2, que obriga o soldador a criar uma ponte de metal fundido para ligar um lado ao outro do chanfro. Esta operação requer tempo e habilidade do operador. Contudo, a grande abertura no chanfro depende maior tempo em passes posteriores, maior volume de metal depositado, mais tempo de arco aberto, maior exposição do metal de base aos efeitos térmicos, somando-se a isso o fator custo de produção.

Por outro lado, o processo TIG pode ser também mecanizado. Em seu trabalho de mestrado, Pigozzo [28] mostra uma aplicação de mecanização com alimentação automática para o passe de raiz em chanfro U. Uma das grandes vantagens que o autor relata e mostra em seus ensaios é a possibilidade da realização da soldagem em 360° do passe de raiz nos tubos, sem parada. Isso é citado como ganho em comparação ao processo MIG/MAG, cuja soldagem é normalmente realizada em duas partes, 180° . Ainda assim, o processo MIG/MAG é enaltecido pela sua competitividade e produtividade. Entretanto, a aplicação de versões convencionais apresenta limitações quanto ao uso em raiz.



Figura 2 – Abertura de raiz em solda realizada com TIG manual

Principalmente em razão de o processo MIG/MAG convencional não atuar diretamente na corrente, pode haver muita variação durante a condução da tocha. Em seu trabalho, Mendonça [29] atribui a variação da corrente à mudança na velocidade relativa com que o arame chega à poça de fusão, dada a consequente oscilação da tocha dentro do chanfro. À medida que há essa oscilação e a tocha se aproxima em um dos flancos do chanfro, a corrente tende a variar para compensar a mudança da velocidade relativa, haja vista a influência dinâmica nesse caso, no qual a corrente atua em função da velocidade de alimentação do arame (V_a). Outra variação da corrente, somado ao que foi exposto acima, é provocada pela diferença de DBCP, diferença esta que o soldador dificilmente consegue manter constante. A diferença da DBCP é ocasionada também em sistemas orbitais mecanizados devido à falta de circularidade que se encontra na maioria dos tubos. Ademais, os ajustes dos trilhos dos equipamentos orbitais não conseguem compensar tal circularidade – havendo, conseqüentemente, variações de altura da DBCP, caso o sistema orbital não esteja assessorado de sensores para correção.

Todas as variações de corrente são extremamente críticas para a soldagem do passe de raiz, em razão de a solda estar em

uma situação de equilíbrio entre a falta de penetração e a perfuração.

Uma solução nesses casos é o uso de um *backing* para sustentar a poça de fusão. Com o uso desse anteparo, é possível aumentar a velocidade de alimentação do arame (V_a) no processo MIG/MAG. Tal aumento gera, conseqüentemente, a elevação da corrente a um patamar que, dificilmente, acarreta defeito de falta de penetração total na raiz.

O *backing*, nas aplicações de construção de dutos, é feito de cobre. *Backings* cerâmicos normalmente são aplicados para soldas de raiz em chapas planas e para sistemas de fácil acessibilidade na parte interna da raiz, o que não é o caso em soldas de dutos. *Backings* cerâmicos também seriam muito frágeis para aplicação em acopladeiras de expansão pneumática ou hidráulica. Brüggemann [30] realizou procedimentos para passe de raiz em tubos com alta velocidade de soldagem (V_s), na ordem de 90 e 95 cm/min, com uso de MIG/MAG convencional mecanizado aplicado em chanfro U com uso de *backing* de cobre. Porém, o uso de *backings* fabricados com cobre pode gerar contaminação no metal de solda [31], o que levaria a ocasionar fragilização do metal de base e também perda nas propriedades mecânicas [9]. Em países Europeus, essa prática é rejeitada por parte das empreiteiras, devido à contaminação dele decorrente.

Outra desvantagem no uso do *backing* de cobre é a capacidade de condutividade térmica elevada desse material, o que deve ser considerada no procedimento em relação aos cálculos de pré-aquecimento dos tubos [32], pois despende em maior tempo e custos no processo.

Um procedimento idealizado para a soldagem de raiz em dutos seria um que permitisse a soldagem sem o uso do *backing*, com suficiente espessura do cordão, evitando assim a necessidade de um passe de reforço, conhecido também como passe quente. Muitos autores em seus artigos exibem palavras para falar sobre as vantagens das versões MIG/MAG em curto-circuito com controle de corrente [19] [21] [33] [34]. Para Cuhel [35], tipicamente os processos por eletrodo revestido, TIG e o MIG/MAG convencional produzem cordões de passes de raiz com espessuras entre 2 mm e 3 mm, dependendo do operador. Já as versões em curto-circuito com controle de corrente, geram raízes com 4 mm ou mais, sendo espessas o suficiente para suportar os requisitos de entrada de calor para versões MIG/MAG

pulsada ou MIG/MAG com eletrodo tubular (*Flux Cored Arc Welding*) no posterior preenchimento da junta. A Figura 3 mostra a comparação de diferentes raízes soldadas.



Figura 3 – Comparação de passes de raiz entre curto-circuito com controle de corrente (esquerda), TIG (centro) e MIG/MAG convencional (direita) [35]

Para a mecanização, é importante haver versões com maior controle sobre as variáveis de soldagem, limitando-as em faixas mais estreitas de trabalho, muitas vezes menores em comparação ao que existe dos processos convencionais, devido às variações decorrentes dos chanfros. Quando a soldagem é feita manualmente, fica mais fácil de o soldador observar essas variações e com isso executar correções pontuais. Outra situação é a ação de escorrimento da poça também na raiz, que apresenta comportamento diferenciado dependendo da posição do tubo e o soldador com sua percepção consegue assim acompanhá-la. Por isso, em se tratando de soldagem mecanizada, é muito importante garantir a cobertura dessas possíveis variações, comuns de serem encontradas no campo durante a execução do procedimento de soldagem [25].

Na maior parte das situações de soldagem em campo, o chanfro “V” é mais comum de ser encontrado, pois apresenta, normalmente, aberturas maiores e acessíveis às condições da soldagem manual. Por se tratar de um chanfro de caráter mais rudimentar e preparado na maioria das vezes por processo de esmerilhamento, o chanfro “V” remete a uma quantidade maior de problemáticas, as quais já foram citadas ao longo deste texto. À medida que tubos de maiores espessuras são requeridos, o chanfro “V” acaba se tornando inviável economicamente. Uma das principais dificuldades nesse tipo de chanfro em grandes espessuras de tubo está relacionada com a consistência da poça de fusão, a qual é dificultada pela grande abertura do chanfro, à medida que as suas camadas vão se sobrepondo. Nesses casos, procedimentos com chanfros mais estreitos, como por exemplo o chanfro “U”, tendem a ser preferidos, dada a diminuição no

tempo de soldagem; menor volume de material depositado; redução no custo com consumíveis e gases, no tempo de preparação, no tratamento térmico pós-solda e na distorção angular [14]; e dada também a maior facilidade da consistência da poça de fusão. Realmente, em raiz com procedimentos mecanizados e sem *backing*, a utilização com chanfro “U” seria uma solução mais adequada, como referenciada por alguns autores [36] [37].

No entanto, as grandes dificuldades na soldagem em chanfro estreito estão associadas com a alta sensibilidade na formação de defeitos, por exemplo, a falta de fusão e a formação de poros. A maior dificuldade, principalmente na raiz, é garantir a efetiva proteção gasosa para o arco e para a poça dentro da estreita e profunda abertura. A configuração geométrica pode promover a sucção de ar, sendo este arrastado pela coluna de gás de proteção dentro do chanfro, enquanto a distância relativamente longa, que às vezes separa o bocal de gás do arco, torna o processo muito sensível [38].

Quanto às normas aplicadas ao passe de raiz em tubos, o procedimento segue critérios de grande exigência e em outras situações, devem atender às demandas do cliente específicas de cada projeto, que muitas vezes estreitam ainda mais os critérios normatizados. A API 1104 (*Welding of Pipelines and Related Facilities*) é uma das principais normas aplicadas à soldagem de dutos. Entre outras, aparecem também a ASME B 31.3 (*Pressure Piping*), ASME B 31.4 (*Pipeline Transportation Systems for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids*), ASME B 31.8 (*Gas Transmission and Distribution Piping Systems*), ISO 5817 (*Welding — Fusion-welded joints in steel — Quality levels for imperfections*). Alguns critérios são imprescindíveis para a inspeção de soldas de raiz em tubos. A Tabela 1 mostra os valores e/ou conceitos dos critérios a serem avaliados neste trabalho.

Um critério que não consta em normas em razão de estas avaliarem apenas o resultado final da junta, porém é altamente crítico na raiz, diz respeito ao formato da face. Nesse aspecto, recomenda-se que o procedimento deposite cordões com mínima convexidade. Na prática, cordões de raiz convexos tendem a gerar falta de fusão em passes subsequentes, além de muitos casos exigirem operações secundárias de esmerilhamento.

Diante dos fatos mencionados, a raiz em uma solda de tubos deve ser íntegra e robusta o suficiente para assegurar a qualidade e o sequenciamento da obra. É considerada o passe de maior complexidade por todas as exigências e dificuldades apresentadas. Ademais, a raiz em um tubo é a região que fica em contato com fluidos, o que pode ser altamente corrosivo ao metal. Na raiz, comparada com os passes de preenchimento, há uma maior diluição, o que acarreta em uma maior dificuldade de controlar a composição química no metal soldado. O acesso para a soldagem da raiz é mais difícil que os passes de preenchimento e pode gerar maior incidência de defeitos e ser mais suscetível à tensão residual. Importante ressaltar que qualquer defeito na raiz é um concentrador de tensões.

Tabela 1 – Critérios Normalizados. Adaptado de [39] [40] [41]

Norma	Trinca	Falta de Fusão	Falta de Penetração	Reforço da Raiz	Perfuração	Concavidade da Raiz	Desalinhamento da Junta
API 1104	NP	A	NP	NR	NP	B	Máx. 3 mm
ASME B 31.3	NP	NP	NP	Máx. 3 mm	NR	Máx. 1,5 mm	Máx. 1,5 mm
ISO 5817	NP	NP	NP	Máx. 3 mm	NP	Máx. 0,5 mm	Máx. 2 mm

Notas:

NP – Não Permitido; NR – Não registrado na norma.

A – O comprimento de uma indicação exceder 25 mm; A soma das indicações exceder 8 % do comprimento total da solda.

B – Qualquer comprimento de concavidade da raiz é aceitável desde que a densidade da imagem radiográfica na região com concavidade não exceda a densidade da região mais fina adjacente.

2.3 VERSÕES MIG/MAG COM TRANSFERÊNCIA POR CURTO-CIRCUITO COM CONTROLE DE CORRENTE

Para entender a razão ou o porquê de essas versões com controle de corrente oferecerem grandes vantagens, precisa-se entender o fundamento do seu funcionamento. Para esse tipo de transferência, modulam as formas de onda de corrente de modo que se obtenha um dimensionamento adequado das gotas transferidas [42]. Desde a formação da gota até a sua transferência por curto-circuito, vários fenômenos físicos acontecem.

Para a formação da gota, o arame eletrodo recebe calor principalmente do arco elétrico e também uma contribuição pelo efeito da potência ôhmica (efeito joule). Com relação às forças envolvidas, a força eletromagnética, a força de arraste do jato de plasma e a força devido à tensão superficial são algumas relatadas por vários autores que explicam o funcionamento dos fenômenos físicos envolvidos para realizar a transferência metálica. A teoria mais aceita para essa transferência considera um balanço de forças atuando no sistema [43].

O arame eletrodo conduz corrente elétrica ao longo de sua extensão sólida; e, assim, está submetido à força eletromagnética, que age no sentido de realizar um estrangulamento na parte deformável do arame, o que ocorre entre a frente de fusão e a interface arco-gota [43]. Esse fenômeno físico é denominado de efeito Pinch e favorece o destacamento da gota.

A força denominada como tensão superficial é a mais pronunciada quando se fala em transferência metálica por curto-circuito controlado. Esta força atua no sentido de reduzir ao mínimo a energia superficial livre [44]. No caso da soldagem MIG/MAG, a força da tensão superficial age primeiramente no sentido de reter a gota metálica ao eletrodo, tendendo à formação de uma forma esférica. No entanto, quando ocorre o curto-circuito, a tensão superficial age no sentido contrário, puxando a gota no sentido da poça [43].

Na versão MIG/MAG convencional, mostrada na Figura 4, o contato inicial do arame com a poça acontece em uma região muito pequena. Tem-se instantaneamente o aumento da intensidade da corrente, o que provoca vaporização metálica [10] – sendo a ocorrência de respingos um ponto desfavorável dessa versão.

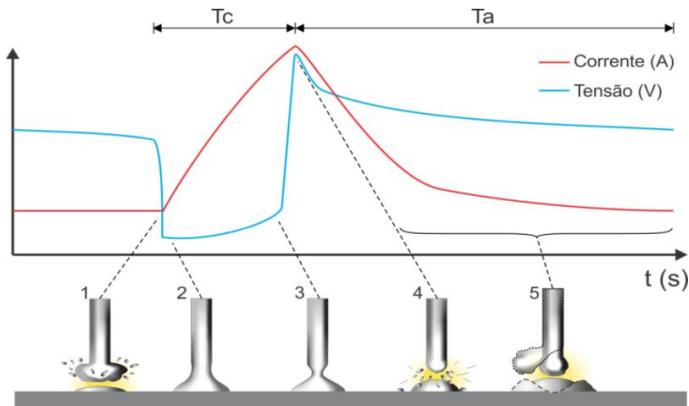


Figura 4 - Esquema da transferência metálica por curto-circuito convencional acompanhada pelos oscilogramas de corrente e tensão versus tempo – Tc: tempo em curto – Ta: tempo em arco [45]

A eliminação dessa problemática acontece quando se diminui a corrente no instante de contato (i_c) [33], o que ocorre nas versões CCC e STT. Isso é visto nos oscilogramas da Figura 5 e Figura 6, quando o valor da leitura de tensão detectada cai a valores próximos a zero. Nesse instante, o efeito da força da tensão superficial age de maneira a acomodar a gota na poça, formando-se uma ponte metálica. A permanência em corrente baixa é de poucos microssegundos (μs), sendo seguida de um pico de corrente (p_c), que tem como função aumentar a força eletromagnética, a qual atua no estrangulamento da ponte metálica. O fim do tempo do pico de modo que possa haver o estrangulamento depende da detecção da iminência de destacamento da gota [10]. No sistema CCC, isso era primeiramente realizado por intermédio da monitoração da resistência de contato, feita pela divisão da leitura da tensão pela corrente [46]. Porém, em versões atuais do CCC e também em versões STT, essa monitoração da taxa de variação da resistência é determinada indiretamente pela medição consecutiva da mudança da tensão por unidade de tempo (derivada). Quando a derivada, de fato, atinge um valor pré-determinado, isso é indicativo de que a gota irá se romper, por isso há uma redução da corrente em uma elevada dinâmica. A gota irá destacar-se em baixa corrente, mas o objetivo principal nesse ponto é que não haja uma reabertura de arco (r_a) explosiva, a ponto de gerar

perturbações no próprio arco, diminuindo assim a tendência de formação de respingos. O valor de corrente nesse instante é entre 40 A e 50 A.

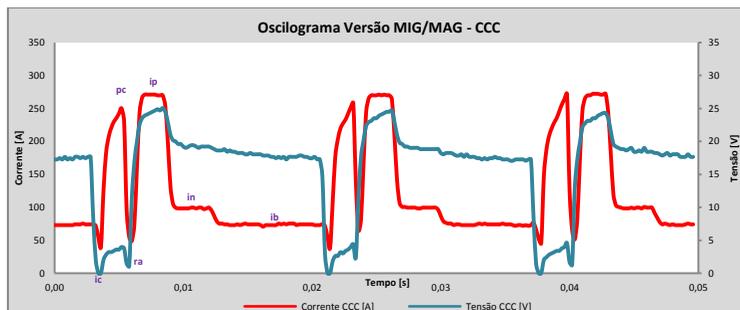


Figura 5 - Forma de onda da versão CCC do fabricante IMC, programa sinérgico C25, arame 1,2 mm

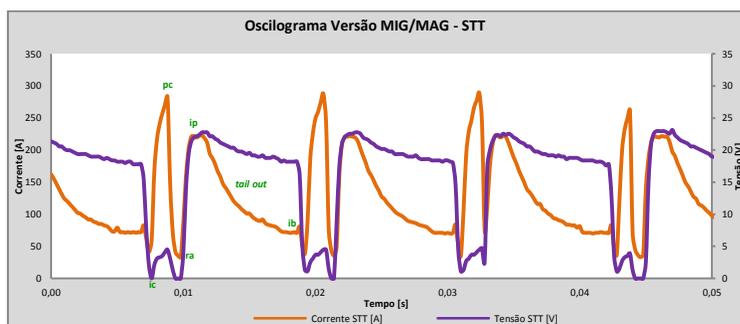


Figura 6 - Forma de onda da versão STT do fabricante Lincoln Electric, programa sinérgico STT - Steel 1,2 mm Ar CO2

Instantaneamente, após a reabertura do arco, um pulso de corrente (ip) é imposto, que em princípio, está sendo feito de modo a manter o processo em equilíbrio. Obedecendo a uma necessidade física, essa corrente tem que subir para que haja a formação de uma nova gota e uma condição de estabilidade para a natureza do processo. Nos oscilogramas dos programas sinérgicos utilizados, é possível observar que para o CCC esse valor é de 270 A, já para o STT é de 220 A. Além do exposto, o pulso causa ainda uma depressão na poça, evitando o contato prematuro com a gota em formação [33].

Na sequência do ciclo, tem-se uma redução da corrente, como forma de gerar amortecimento da poça e fluidez do metal

fundido [46]. No CCC, o decréscimo apresenta um patamar intermediário (in), promovendo um ajuste fino no aporte térmico do processo [45]. Já no STT, essa fase é conhecida como *tail out*, na qual ocorre um decréscimo exponencial para o valor de base. Um decréscimo rápido da corrente não seria aceitável, porque poderia resultar em perturbações no processo [47].

O ciclo de controle de corrente tem-se a sua continuidade com a corrente de base (ib), que nas duas versões fica em torno de 75 A. Essa corrente é mantida em patamar baixo, garantindo o aquecimento dos eletrodos (gota e poça), a fluidez dos mesmos, assim como a manutenção do arco [46].

A Figura 7 mostra a sequência detalhada da versão CCC, a partir da gota plenamente formada, o contato inicial, à formação da ponte metálica até sua ruptura, a reabertura do arco e, por último, a formação de uma nova gota dando continuidade ao ciclo.

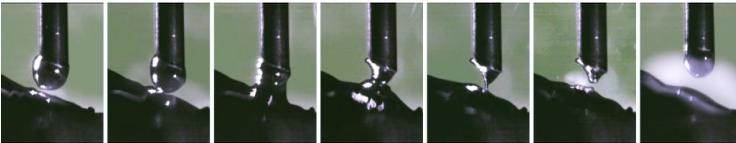


Figura 7 - Imagens reais da transferência metálica do sistema CCC da empresa IMC-Soldagem

Com relação à versão CMT, o seu funcionamento é realizado com um sistema eletromecânico, que integra ao processo de soldagem um movimento reversível do arame. Em todo o instante em que o curto-circuito ocorre, o programa reduz o fornecimento de energia e controla a retração do arame, como mostrado na Figura 8, em frequências da ordem de 70 Hz, o que auxilia no destacamento da gota [48]. Essa dinâmica é realizada devido ao fato de o equipamento possuir um sistema de alimentação de arame composto por dois motores, sendo um no cabeçote alimentador e o outro, o motor da tocha, além de também possuir um sistema de absorção de arame chamado *buffer*. Em uma visão simplificada, o motor do cabeçote fornece a média da velocidade de arame para o *buffer*, sendo que o motor da tocha, responsável pelo movimento de avanço e recuo de arame, é suprido pelo arame do *buffer* [49].

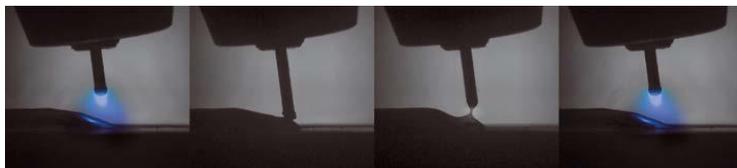


Figura 8 - Principais fases da versão CMT [48]

No programa sinérgico utilizado para soldagem de raiz em tubos de aço de baixo carbono, a forma de onda mostrada na Figura 9 representa o comportamento da corrente e da tensão durante alguns ciclos.

O instante de contato (i_c) é perceptível com a queda de tensão, sendo que a corrente de base (i_b) antecedente a isso, que serve para manter a gota aquecida e a manutenção do arco, apresenta valores próximos a 90 A. Logo após, tem-se um aumento da corrente a 250 A e a desaceleração do avanço do arame. Na metade deste patamar, começa a acontecer o recuo do arame (r_e), e, na sequência, a corrente volta a baixar a valores de 75 A, acontecendo o rompimento da ponte metálica. A reabertura do arco (r_a) acontece sequencialmente, ainda em baixa corrente, e um aumento praticamente instantâneo da corrente, chamada de corrente de pulso (i_p), age para a formação de uma nova gota. O arame, que ainda nessa fase está recuando, começa a desacelerar e inverte o sentido na metade do patamar, estando a um valor de aproximadamente 330 A, e começa a avançar no sentido da poça novamente (a_v). Depois de um determinado tempo, a corrente volta a baixar para a corrente de base (i_b), ocorrendo assim a continuação do ciclo.

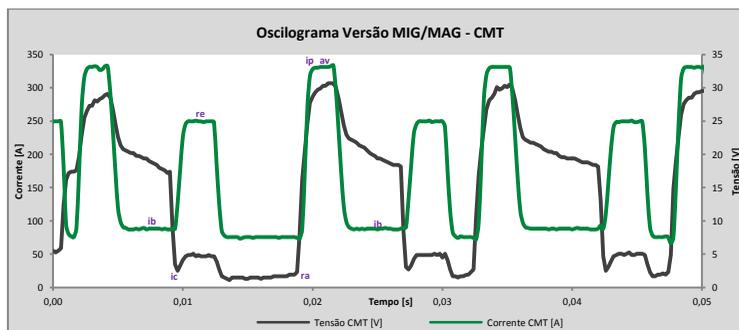


Figura 9 - Forma de onda da versão CMT do fabricante Fronius, programa sinérgico G3Si, arame 1,2 mm

3 ANTECEDENTES

Neste capítulo, serão descritas as etapas de evolução, desde o contato inicial do autor com a soldagem orbital MIG/MAG até os estudos de pontos específicos que auxiliaram na consecução do objetivo geral do trabalho.

Considerando que este trabalho não está isolado dos objetivos do LABSOLDA, pois a temática da soldagem orbital já vinha sendo estudada e aprimorada com as tecnologias disponíveis dentro do laboratório, o DESAFIO PETROBRAS representou um fator impulsionador para que o autor deste trabalho iniciasse sua pesquisa nessa área.

3.1 DESAFIO PETROBRAS

O trabalho foi iniciado a partir de um desafio lançado pela PETROBRAS, FBTS (Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem) e SENAI CTS de Solda, com o objetivo de incentivar que empresas nacionais apresentassem capacitações para a soldagem orbital mecanizada de tubos de parede espessa. Uma série de requisitos foi estabelecida como condição para a realização da soldagem, para a qual foram simuladas as situações mais críticas encontradas em campo. Somado aos fatos mencionados, o desafio foi lançado com o intuito de se buscar procedimentos de maior produtividade, repetibilidade e melhores condições humanas, comparadas com as situações encontradas atualmente no cenário da soldagem de dutos.

Dos requisitos impostos no desafio, os principais são [50]:

- Obrigatoriedade na utilização de sistema de soldagem mecanizado;
- O acoplamento dos tubos deveria ser realizado com o auxílio de uma acopladeira interna;
- Os consumíveis de soldagem para o passe de raiz e para o passe quente, obrigatoriamente, deveriam possuir teor de Níquel (Ni) inferior a 0,2%. Para os demais passes, o máximo teor de Ni foi limitado em 1%;

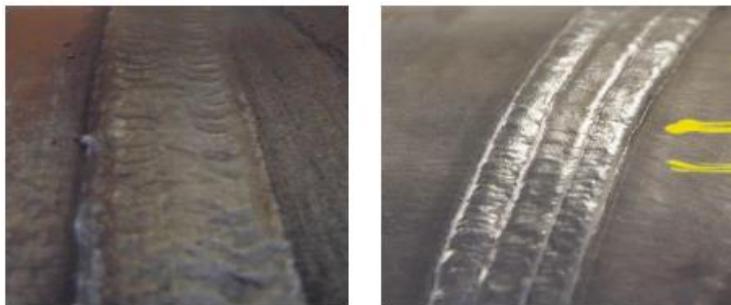
- O controle de pré-aquecimento e temperatura interpasse necessitaria ser mantido entre 100° a 175° C;
- O tubo teria de estar inclinado a 20° em relação a horizontal.

A partir da definição que o LABSOLDA iria participar do desafio, foi organizada uma equipe para o levantamento de procedimentos e das condições para a soldagem. Iniciou-se com a preparação e a usinagem das juntas com chanfro em V, abertura total de 60°, em tubos de aço API 5L Grau B, com diâmetro de 16” e parede com espessura de ½”. Os tubos foram montados na posição 5G, inclinados a 20° em relação à horizontal.

Para o levantamento das variáveis elétricas e as variáveis de movimento da soldagem, experimentos manuais foram desenvolvidos, observando-se com extrema criticidade o movimento do soldador, como tentativa de replicar essas variáveis em sistema mecanizado.

Com relação ao processo de soldagem para o passe de raiz, foi utilizada a versão sinérgica do processo MIG/MAG denominada CCC, com arame eletrodo ER 70S-6 de 1,2 mm. Os demais passes foram realizados com arame tubular E 71 T-1 de 1,2 mm, com versão pulsada adaptativa do processo MIG/MAG, sendo todas as soldas realizadas com a mistura de gases C25 (75% AR – 25% CO₂). Os arames utilizados foram escolhidos para atender aos requisitos impostos com relação ao teor de Ni.

Em seguida, a soldagem mecanizada foi inserida, com a utilização do manipulador orbital Tartílope V3, na qual a mecanização total do processo foi uma das regras do desafio. Para as primeiras análises, foram realizadas apenas inspeções visuais. Percebeu-se nos passes de acabamento a tendência de escorrimto do cordão, como mostra a Figura 10 (a), devido à inclinação da montagem dos tubos. Como solução, foram introduzidos passes sobrepostos no cordão de acabamento, gerando resultados mais satisfatórios, os quais estão apresentados na Figura 10 (b). Esses primeiros ensaios serviram de base para a formação de informações preliminares, na tentativa de parametrização do procedimento de soldagem, além de experiência e conhecimento na operação do equipamento mecanizado na soldagem dos tubos.



a) b)
Figura 10 - Cordão com tendência de escorrimento para o lado esquerdo; b) Cordões de acabamento sobrepostos

No entanto, para a realização do desafio da PETROBRAS, foram utilizados tubos de aço API 5L X70MS, com diâmetro de 22" (558,8 mm) e espessura de parede 1 ¼" (31,7 mm). Na tentativa de otimizar o metal de solda depositado, elaborou-se uma geometria de chanfro em V modificada, com o objetivo de se reduzir a abertura total da junta, detalhada na Figura 11 (a). Para a deposição dos cordões de solda, nesse tipo de chanfro, foram utilizadas tochas com bocais mais estreitos do tipo *Narrow Gap*, permitindo o seu acesso mais facilitado em comparação a tochas com bocais de formato cilíndrico.

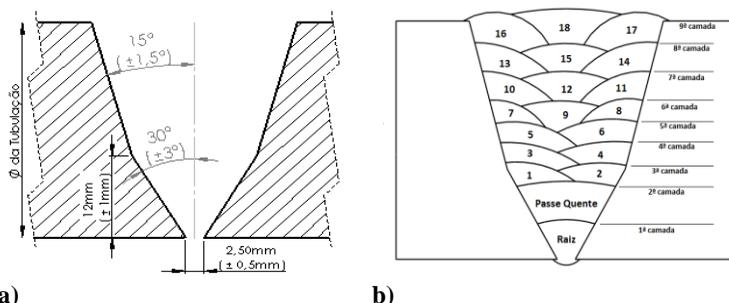


Figura 11 - a) Detalhes do chanfro em V modificado; b) Sequência de passes

À medida que a sobreposição dos passes foi sendo depositada na junta, a abertura do chanfro aumentava e uma maior amplitude de tecimento era necessária para a total abrangência da solda no chanfro. Porém, para a realização de uma

camada em apenas um passe, o bocal acabava encostando-se às bordas do chanfro, restringindo o movimento da tocha e consequentemente afetando a molhabilidade da poça metálica, o que deixava o procedimento suscetível à falta de fusão nas extremidades. Como tentativa de solução, foi realizado o sequenciamento de cordões com amplitudes menores, além da colocação da tocha com um pequeno ângulo de trabalho contrário à borda do chanfro.

A operação, desde a montagem dos tubos, realização do procedimento de controle térmico, vistoria de consumíveis até a operação de soldagem, foi acompanhada e relatada em documentos por inspetor de soldagem N1, sendo a sequência de passes realizada conforme a Figura 11 (b).

O procedimento de preenchimento com arame tubular necessitou de limpeza a cada intervalo de passes, em razão da escória gerada por esse tipo de arame. A escória, caso não seja removida de forma adequada, pode deixar o procedimento suscetível ao aparecimento de inclusões de escória. Essa etapa adicional de esmerilhamento deve ser contabilizada no tempo total da solda.

Somadas aos fatores mencionados anteriormente, outras dificuldades foram observadas durante a realização da operação, constituindo o passe de raiz, dentre todos os passes, o mais difícil de ser realizado. A variação da abertura de raiz (*gap*) ao longo da circunferência do tubo, ocasionada primeiramente pelo fator usinagem e posteriormente pela montagem da junta com a acopladeira, e o desalinhamento entre os tubos (*High-Low*) propiciaram o aparecimento de defeitos, como a falta de fusão em partes da raiz soldada, mostradas na Figura 12.



Figura 12 - Falta de fusão e variação de gap em cordão de raiz

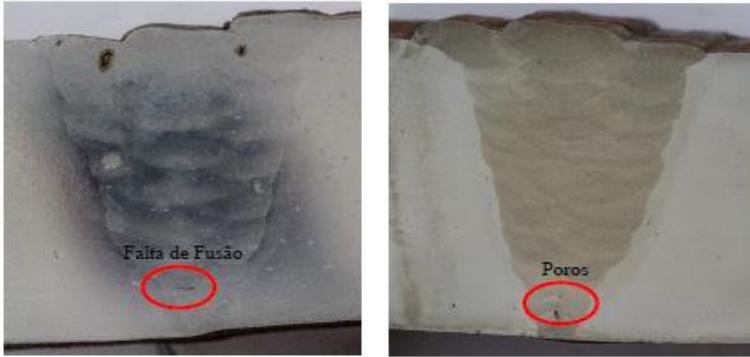
Uma descontinuidade perceptível durante o intervalo entre a sobreposição dos passes foi o aparecimento de poros em partes dos cordões de preenchimento, principalmente na posição vertical descendente (PV) - 3h, posição sobrecabeça (SC) - 6h e PV - 9h. Uma hipótese que explica o aparecimento dos poros é a ineficiência da proteção gasosa fornecida pela tocha utilizada, do tipo *narrow gap* do fabricante SPA. Essa tocha possui um sistema diferente no difusor de gás em comparação às tochas comuns MIG/MAG, como mostrado na Figura 13. Dreher et al. [51] mostram, por intermédio de simulações computacionais e do uso da técnica *Schillieren*, como diferentes bocais e difusores interferem no perfil de distribuição do gás de proteção.



Figura 13 - Tochas: 1 - *Narrow Gap* SPA; 2 - Aletada SPA; 3 - Tocha MIG/MAG Comum

Com a presença de poros, a necessidade de reparos com esmerilhamento despendeu um tempo total maior de operação, originando o aparecimento de defeitos nos passes subsequentes. Problemas de espalhamento da poça de fusão nas diferentes posições e cordões solidificados, com diferentes perfis de convexidade ao longo da junta, acarretaram a possibilidade do surgimento de defeitos, como a falta de fusão no ancoramento entre os passes, sendo estes evidenciados em análises de

ultrassom, radiografias e macrografias. As macrografias da Figura 14 demonstram os defeitos citados.



a)

b)

Figura 14 – Descontinuidades e defeitos; a) Posição PV – 3h; b) Posição PV – 9h

Em todo o procedimento operacional foi realizada a soldagem total de um corpo de prova, a qual se evidenciou várias problemáticas – o que afetou diretamente a qualidade da junta soldada. Algumas são de origem específica do manipulador robótico, como o curso limitado do eixo transversal (eixo y), o sistema de fixação e regulagem de ângulo da tocha, o sistema de fixação do trilho e a velocidade de movimentação em eixo longitudinal (eixo x) para facilitar posicionamentos rápidos.

Durante a soldagem, tinha-se a necessidade da inclinação do ângulo de trabalho da tocha para a realização dos passes filetados de preenchimento. Particularmente, à medida da evolução das camadas de solda, a limitação do eixo y do manipulador afetava o posicionamento desses ângulos, necessitando, pois, da mudança no trilho para compensá-los.

A fixação da tocha não era robusta o suficiente. Conforme os cabos se aqueciam e o suporte da tocha, acabava-se desencadeando o afrouxamento da tocha, o que gerava alteração nos ângulos estabelecidos inicialmente.

Problemas adicionais, como o sistema de fixação e o sistema de espaçadores do trilho do manipulador, acrescentavam pouca agilidade ao procedimento. Para o trilho, como este é bipartido, necessitava-se de dois operadores para a sua colocação

e de ferramentas externas para o ajuste. Quanto mais paralelo o ajuste do trilho com o centro da junta, menor a interferência do operador na correção durante a soldagem. Para os espaçadores, elemento importante que impacta na variação da DBCP do sistema de soldagem, foi realizado a ajustagem individual, tornando-a demorada.

Outros pontos a destacar são as condições mais favoráveis na seleção de periféricos, como tochas, bicos de contato, bocais e difusores de gás para o atendimento de um procedimento confiável.

Todos esses levantamentos e outros que surgiram no decorrer do trabalho puderam servir de subsídio para a equipe de projeto na melhoria do sistema orbital.

3.2 EQUIPAMENTOS DE SOLDAGEM ORBITAL

Na seção anterior, identificaram-se várias limitações encontradas em uma aplicação real de soldagem orbital. No contexto apresentado, apenas os equipamentos desenvolvidos no LABSOLDA foram utilizados. O contato inicial com a operação de todo o sistema foi de extrema importância, até mesmo no que diz respeito à comparação operacional com outro equipamento com a mesma finalidade.

O sistema disponível no laboratório é o *Pipeliner II* da empresa *Magnatech*. Algumas soldas foram realizadas em tubos de 16" (406,4 mm) e espessura de 1/2" (12,7 mm), e também em tubos de 22" (558,8 mm) e espessura de 1 1/4" (31,7 mm). O objetivo principal dessas soldas foi apenas avaliar a forma construtiva, os mecanismos de fixação, o comportamento do equipamento, a observação dos periféricos e a visão operacional.

Quanto à forma construtiva, o *Pipeliner II* é um sistema integrado com fonte de energia, painel de comando de variáveis elétricas e de movimentação, cabeçote de alimentação de arame e reservatório do sistema de refrigeração da tocha, todos mostrados na Figura 15. Ademais, conta com o manipulador robótico, tocha refrigerada à água adaptada ao manipulador e IHM (interface homem máquina).

O manipulador robótico conta com três eixos de movimentação automatizados: eixo de deslocamento longitudinal (eixo x), deslocamento transversal para sistema da tocha (eixo y) e deslocamento da altura da tocha (eixo z). Esses mecanismos

estão montados, de tal forma, que todos seus componentes ficam expostos ao meio de trabalho, ou seja, não estão enclausurados. Uma vantagem dessa montagem é a facilidade de manuseio devido ao peso. No entanto, os meios hostis de trabalho desprendem particulados metálicos, poeira e umidade, que podem gerar avarias no equipamento. Outro sistema interessante e vantajoso do manipulador é o desprendimento rápido do engrenamento do eixo x, proporcionando agilidade no posicionamento em qualquer ponto do tubo, quando em operação em vazio.



Figura 15 - Sistema de soldagem orbital Magnatech – adaptado de [52]

A tocha é compacta e dedicada ao sistema, com fixação rígida, e possibilita regulagens no ângulo de ataque e ângulo de

trabalho. Para auxílio na alimentação de arame, conta com um sistema adicional integrado no manipulador posicionado antes da tocha. O sistema ajuda a tracionar o arame eletrodo e empurra-o até o bico de contato, conhecido como sistema *Push-Pull*, reduzindo o efeito mola do arame eletrodo em sua alimentação.

O trilho de deslocamento do manipulador possui um fácil e rápido sistema mecânico de ajuste e fixação no tubo. O acoplamento do manipulador ao trilho é realizado por meio de roda de contato encaixada em uma correia trapezoidal, colada na sua superfície, como pode ser observada no item 2 da Figura 15. Esse trilho é um componente bipartido, porém um dos lados é fixo e não permite abertura, apenas regulagem. No outro lado há a função de abertura, acoplamento e ajuste por meio de parafuso, exigindo-se auxílio de ferramenta externa. Outra funcionalidade interessante do sistema de fixação são os mecanismos pneumáticos para o acoplamento do manipulador ao trilho. Em cada uma das quatro rodas, há válvulas de comando pneumático vinculadas, com pequenos cilindros de simples ação e retorno por mola. Ao acionar uma válvula de sinal, tem-se a atuação simultânea de pequenos êmbolos dos cilindros pneumáticos, e quando desacionada, as molas recuam, voltando os êmbolos que fixam o manipulador ao trilho. O sistema é ágil e de fácil manuseio, além de funcionar com a pressão do próprio cilindro de gás de proteção.

O manipulador permite realizar trajetórias lineares e triangulares da tocha, com tempo de parada na extremidade do movimento. O painel de comando, item 5 da Figura 15, conta com quatro níveis de regulagem para variáveis elétricas e de movimento. Cada variável é definida por intermédio de potenciômetro, que possui uma faixa de valores adimensionais para regulagem. Uma limitação considerada nesse sistema é essa regulagem, a qual o operador, não sabendo a unidade de medida imposta as variáveis, deve regular o procedimento por tentativa ou erro, ou com variáveis definidas previamente informadas pelo fabricante. Para saber os valores pré-definidos, técnicas de medição devem ser empregadas. Constata-se, contudo, dificuldade de concatenação, devido as várias possibilidades de regulagem.

Na fonte incorporada ao sistema, há apenas três modos sinérgicos operacionais: pulsado, convencional em curto-circuito e convencional com destacamento em voo livre (spray). Para os

três modos deveriam ser selecionados o material de adição pré-definido na fonte, diâmetro de arame eletrodo e gás de proteção.

Na interface homem máquina (IHM) do equipamento, há potenciômetros e botões para realizar a correção de trajetória, controle de altura da tocha, botões de posicionamento inicial, botões de início e fim da solda, ajuste fino de velocidade de soldagem e amplitude de tecimento e possibilidade de alteração de variáveis pré-definidas na unidade de controle. Todas as regulagens são possíveis de serem realizadas com o arco aberto.

Do ponto de vista operacional, há a possibilidade de alterar a configuração de consumíveis na tocha, como bicos de contato, bocais e conduítes. Os programas sinérgicos incorporados na fonte geram boa estabilidade no processo, e o equipamento é robusto na movimentação da tocha, com bom desempenho dinâmico.

O equipamento como um todo é um conjunto industrial específico e preparado para realizar soldas de preenchimento de tubos. Existe uma limitação do conjunto, de maneira que nesta interface não se tem uma versão em curto-circuito com controle de corrente para realização de passes de raiz. Há artigos que mencionam a utilização do equipamento apenas para preenchimento, os quais citam o passe de raiz sendo realizados com a soldagem manual com versões em curto-circuito com controle de corrente [7].

Em razão de o equipamento não permitir a alteração de programas na fonte, fica limitado às condições já existentes. Entretanto, o fabricante afirma que o equipamento produz soldas com consistência robótica e precisão, apresentando um histórico comprovado de confiabilidade e produtividade [53].

Em comparação, o Tartilope V3 também conta com três eixos automatizados. O equipamento é enclausurado com carenagem de alumínio para proteção de seus sistemas internos, permitindo a adaptação de modelos de tochas diferenciadas, com seus respectivos consumíveis. O encaixe do manipulador ao trilho é realizado por sistema de atrito entre rodas e correia, assim como o *Pipeliner II*. O método de fixação no trilho dá-se por meio de grampos individuais, com ajuste de aperto, o que é considerado uma limitação do equipamento. Dependendo da sensibilidade e cuidado, o operador pode deixar o manipulador muito apertado no contato com o trilho, restringindo seu movimento, ou deixar com pouco aperto, o que pode fazer com que o manipulador

deslize no trilho. Nos dois casos terá interferência direta com a velocidade de deslocamento do manipulador.

Como o equipamento é totalmente independente, é possível adaptá-lo a qualquer fonte de energia, utilizando-se os benefícios das versões e programas disponíveis. Ao contrário do equipamento anteriormente citado, não restringe a utilização para passe de raiz e, em sua IHM, concede a regulagem dos variáveis de soldagem com valores e unidades de medida, melhorando a orientação para o operador.

Como o laboratório detém a tecnologia do equipamento, é possível realizar a comunicação com fontes, a sincronização de trajetórias, a definição de parametrização por trechos no tubo e a definição no perfil de movimentação da tocha, que pode ser linear, triangular e trapezoidal, apresentando assim um bom desempenho dinâmico, como será visto em seções posteriores. As limitações desse sistema já foram discutidas na seção 3.1.

Os dois sistemas apresentam pontos favoráveis e limitações, mas atendem, porém, ao objetivo de realizar soldas mecanizadas em tubos.

3.3 DESENVOLVIMENTO CCC

O CCC é uma tecnologia desenvolvida no LABSOLDA e vem sendo pesquisada e aperfeiçoada há alguns anos em diversos trabalhos, por diferentes pesquisadores.

Começou a ser estudado a mais de 17 anos atrás por Baixo [54], que desenvolveu metodologias destinadas ao controle da forma de onda da corrente, aplicadas à transferência por curto-circuito. Em seu estudo, propôs uma relação que permitia associar a velocidade de alimentação do arame à corrente de soldagem. Também estabeleceu uma relação para associar o volume fundido à energia no período do arco. Desenvolveu algoritmo dedicado a uma metodologia de controle baseada em três níveis de corrente, utilizando como critério de estabilidade a produção de salpicos. Os resultados permitiram produzir depósitos com geometria favorável, quanto à altura do reforço do cordão e à largura do depósito, na soldagem em ambiente hiperbárico.

Em sua tese de doutorado, Gohr Jr. [55] criou métodos de controle do arco voltaico, da transferência metálica e da poça de fusão, consolidando-os em um equipamento de soldagem.

Desenvolveu a fonte de energia e a primeira tentativa prática de gerar o CCC, na qual já implementou a filosofia dos atuais programas de controle do curto-circuito, que é a diminuição da corrente tanto no instante de curto, quanto na eminência do destacamento da gota, com o objetivo de reduzir o nível de respingos. Dois métodos de controle foram implantados na versão CCC para realizar as alterações citadas anteriormente: uma delas baseada em um dispositivo eletrônico para monitorar a tensão e a outra por meio de algoritmo de controle.

No trabalho de Silva [8], foram identificadas e realizadas melhorias de *hardware* e *software*, atuando, pois, em questões mais detalhadas do CCC, como o controle do tamanho da gota e a monitoração no curso da transferência metálica. Diferentes formas de onda de corrente foram estudadas, inclusive valores de variáveis, adotando-se a forma de onda em três níveis, as quais também foram usadas nos trabalhos de Baixo [54] e de Gohr Jr. [55], aperfeiçoando-a assim em todos os níveis. Silva também fez os primeiros ensaios em chanfros, vislumbrando a sua aplicabilidade em passes de raiz em tubos, com benefícios na qualidade e produtividade, em relação ao processo eletrodo revestido.

Direne Filho [45], em seu mestrado, atuou na implementação de *hardware* e *software* juntamente com o fabricante da fonte de soldagem, atingindo um controle de alta dinâmica na forma de onda de corrente, melhorando assim as condições de realimentação e controle das variáveis elétricas da versão CCC. Também foram desenvolvidos programas sinérgicos para os arames ER 70S-6 de 1,0 mm e 1,2 mm com a mistura C 25 (75% Ar + 25% CO₂), com o principal objetivo de aumentar a facilidade de utilização da versão por parte do operador. Por meio desse trabalho que de fato, o CCC começou a se tornar um processo industrial.

De acordo com o fabricante da fonte de soldagem [56], após os trabalhos supracitados, foram realizadas algumas alterações com o objetivo de melhoria da versão. Nessa versão, além de o software de controle ter suas características melhoradas, o próprio hardware do equipamento sofreu alterações que propiciaram uma maior dinâmica de atuação e resposta sobre as variáveis de soldagem, especificamente, a corrente. A Figura 16 mostra a forma de onda utilizada nessa atualização.

Uma das alterações realizadas foi na reabertura do arco. Na versão anterior, após a detecção da iminência do rompimento da ponte metálica, a corrente era comandada a diminuir e o programa da fonte aguardava 1 ms na expectativa de que o arco naturalmente fosse reaberto. Caso isso não acontecesse, após esse tempo de 1 ms, o programa mandava um comando para fonte e a corrente iria para fase Ia1. Com as alterações na nova versão, espera-se apenas 0,6 ms. Caso o arco não reabra, o programa envia um sinal para a fonte iniciar novamente a fase de curto, retomando a fase Ic3. Outro item alterado foi o tempo de reação da fonte após a reabertura do arco, a qual, após as melhorias efetuadas, ficou cerca de 200 μ s mais rápida. Anteriormente, devido à lógica que estava implementada na detecção da reabertura, o tempo de atraso para o programa comandar a corrente para o nível Ia1 levava 200 μ s. Atualmente, o programa tem capacidade de comandar a subida da corrente instantaneamente no momento da detecção [56].

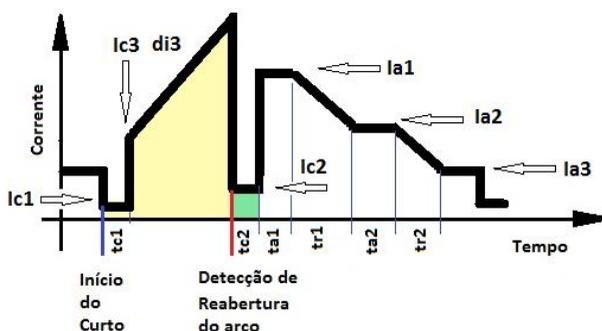


Figura 16 - Forma de onda da versão CCC [56]

Outra modificação foi a implementação do patamar intermediário Ia2 na fase de arco. Antes era usado apenas Ia1 e Ia3. Atualmente utiliza-se Ia2 durante 3 ms, e seu valor é limitado a um mínimo de 40 A. Para Ia3, o valor é limitado no máximo em 75 A, sendo este sempre 20 A menor que Ia2.

O objetivo da implementação de Ia2 foi aumentar a energia na fase de arco, com a garantia de que a trecho final possuísse menores níveis de corrente, de modo a reduzir o efeito repulsão da gota no momento do curto-circuito.

Com as alterações na nova versão do CCC, foram realizados ensaios de soldagem que configuravam situações reais de operação, em passe de raiz com diferentes diâmetros e espessuras de tubos. Um dos objetivos foi a comprovação da robustez em distintas situações de regulagens na V_a e em diferentes formas geométricas de chanfro. Fez-se uma análise do perfil geométrico resultante no cordão de solda, perfil este que foi também comparado com outras versões em curto-circuito com controle de corrente.

3.3.1 Regulagem do sinérgico CCC

No sinérgico utilizado neste trabalho, as variáveis reguladas são a V_a e “a”. Alterando-se V_a , conseqüentemente variáveis como corrente e tensão modificar-se-ão para compensar a mudança. A variável “a” é utilizada para alterar a energia na soldagem CCC, que atua sobre as correntes I_{a2} e I_{a3} , limitadas às condições de mínimo de 40 A para I_{a2} e máximo de 75 A para I_{a3} , modificando assim a corrente média de uma forma geral.

Para permitir um refinamento do sinérgico, pode-se usar a opção “CONFIGURAR” no menu, mostrado na Figura 17, que disponibiliza a regulagem das variáveis C_{ta} e C_{kr} , as quais atuam respectivamente sobre o tempo t_{a1} e a variável de detecção de reabertura do arco.

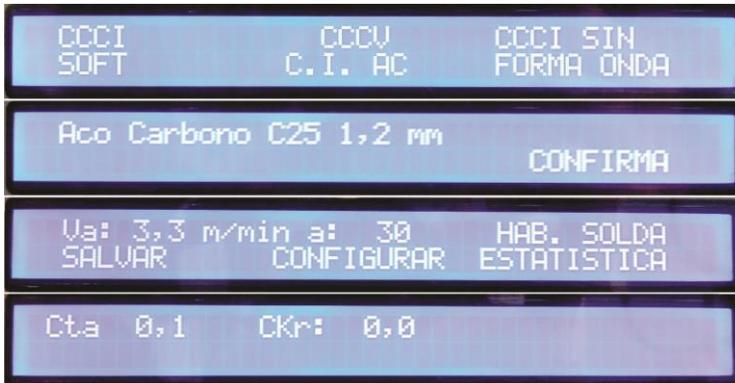


Figura 17 – Sequência de regulagem do sinérgico CCC na fonte Digiplus A7

O sinérgico foi otimizado para operar em passes de raiz. No entanto, conforme a configuração do chanfro, da DBCP, ou também, da aplicação deste programa na soldagem de chapas finas, pode ser necessário alterar as variáveis “a”, “Cta” e “Ckr”. A variável “Cta” aumenta/diminui o tempo de atuação da corrente Ia1, que é a corrente de pico após a abertura do arco e principal fonte de energia para formação da gota. Já “Ckr” atua sobre a formação de respingos. Quanto menor o valor de “Ckr”, a detecção da reabertura do arco tende a ser antecipada. Porém, uma demasiada antecipação dessa detecção pode fazer com que a corrente seja reduzida de forma precipitada. Isso diminui as forças de destacamento da gota, podendo prolongar o tempo de curto-circuito, “esfriando” assim a poça e podendo tornar o processo instável [56].

4 MATERIAIS E MÉTODOS PARA ENSAIOS DE SOLDAGEM

Neste capítulo serão abordados os materiais e os equipamentos utilizados para realização dos ensaios de soldagem, bem como a metodologia aplicada, sendo divididos os temas do capítulo em ensaios de raiz em chanfro em V e ensaios de raiz em chanfro U.

Em um planejamento inicial, constava os dois tipos de chanfros para tentativa de uma raiz robusta. Com o decorrer dos ensaios, verificaram-se algumas dificuldades na realização de raiz em chanfro “V”. Além disso, informações colhidas internacionalmente de que a versão CMT da empresa *Fronius* produzia bons resultados para raiz em chanfro “U” contribuíram para que ensaios nesse tipo de chanfro fossem realizados com maior ênfase.

4.1 SOLDAGEM EM CHANFRO “V”

4.1.1 Materiais e equipamentos

Para a realização dos ensaios, foram utilizados tubos de aço de baixo carbono da especificação API 5L Grau B, com diâmetro externo de 16” (406,4 mm) e espessura de parede ½” (12,7 mm). Primeiramente, foram usinadas as extremidades do tubo com chanfradeira/biseladora hidráulica da marca Protem e montado o chanfro em “V”, ângulo de abertura 60°, sem nariz, como mostrado na Figura 18. Na montagem das juntas, tomou-se cuidado com o melhor posicionamento entre os tubos, a fim de se evitar desalinhamentos e variações de abertura da raiz, que pudessem de alguma forma interferir na soldagem. As verificações dessas medidas foram feitas com calibre de solda, tendo como valor de referência a abertura da raiz ao longo da junta entre 2,5 mm e 3,0 mm.

O equipamento utilizado em todos os ensaios para a manipulação da tocha no percurso dos tubos foi o Tartílope V3, que constitui um desenvolvimento tecnológico do LABSOLDA [57]. Esse manipulador robótico se desloca sobre um trilho, como mostrado na Figura 19, de modo que pode ser realizada a regulação das variáveis de movimentos antes e durante a execução da solda.

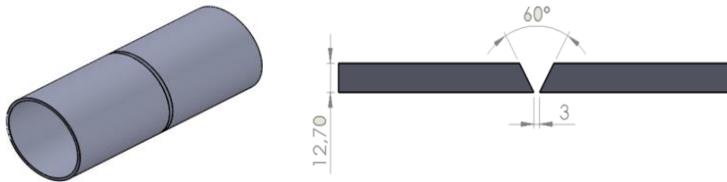


Figura 18 - Desenho esquemático de chanfro em “V” usado em tubos

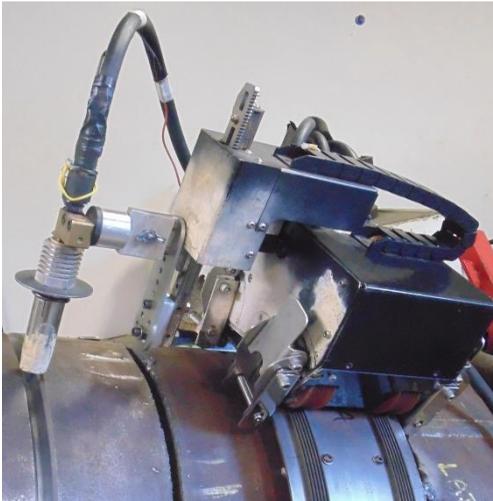


Figura 19 - Manipulador robótico Tartílope V3

Visto as problemáticas nos antecedentes quanto à utilização da tocha *Narrow Gap* da SPA, tocha número 1 da Figura 13, em todos os ensaios para raiz com a versão CCC e STT, empregou-se a tocha aletada, número 2 da Figura 13, refrigerada a gás, também da marca SPA, na qual proporcionou boas condições para realização da soldagem de raiz. Essa tocha, ao contrário de vários modelos que utilizam o sistema de rosca para o bico de contato, dispõe de um sistema de pinça para fixar os bicos de contato. Isso permite a alteração da altura da DBCP apenas com a regulagem do bico de contato, sem alterar a altura do bocal. Para a versão CMT, a tocha refrigerada à água utilizada foi a do próprio equipamento da *Fronius*, que apresenta em sua configuração o sistema *push-pull*.

Como metal de adição usou-se o arame ER70S-6 de 1,2 mm, proteção gasosa com a mistura C 25 (75% Ar, 25% CO₂) e vazão de 15 L/min.

Para a aquisição de dados, empregou-se o Sistema de Aquisição Portátil – SAP, do fabricante IMC. O sistema faz a aquisição de sinais de corrente, tensão e velocidade de arame em uma frequência de 5 kHz. Os dados adquiridos são dispostos em formas de gráficos e histogramas, permitindo análises detalhadas do procedimento realizado. Além do mencionado, podem ser analisados trechos específicos independentemente dos demais trechos adquiridos, o que permite uma verificação detalhada de algum evento ocorrido.

4.1.2 Metodologia

Considerando-se que é bastante comum a divisão da seção de um tubo como se fosse um relógio, as soldas foram executadas todas na progressão descendente, sem a utilização de anteparo da poça de fusão (*backing*). A solda iniciou-se a partir da posição 12h até 6h, percorrendo 180° do tubo. Para as análises de resultados, foi estipulado que a posição 11h do tubo referenciava-se à posição plana (PP), 9h à posição vertical descendente (PV) e 7h à posição sobrecabeça (SC), conforme orientações da Figura 20. Outra questão que vale ressaltar é que esses ensaios foram todos executados no sentido anti-horário, devido ao melhor arranjo da bancada de ensaios (melhor disposição de cabos, de fontes, sistemas de aquisição de dados, etc.).

A fim de se encontrar variáveis de soldagem aceitáveis para uma solda de qualidade para a raiz, ensaios preliminares foram realizados em tubos com as versões CCC e STT. Primeiramente, com a soldagem manual e a verificação de movimento do soldador, e posteriormente com a adaptação para a soldagem mecanizada.

Nas duas versões MIG/MAG, CCC e STT, foram usados programas sinérgicos. Na máquina da IMC – Digiplus A7, a versão sinérgica é o CCC na opção “Aço carbono C25 1,2 mm”. Dentro dessa opção, a velocidade de alimentação de arame (Va) regulada foi de 3,3 m/min, e os parâmetros “a” em 30; “Cta” em 1,0; e “Ckr” em 0,0. Esses parâmetros foram descritos na seção 3.3.1. Já na máquina da *Lincoln Electric – Power Wave 455 M/STT*, o sinérgico utilizado foi a opção STT “steel 1,2 mm - Ar

CO₂”, com a regulagem de V_a em 3,3 m/min. O parâmetro “Peak”, que controla a corrente de pico do processo durante a fase em que o arco está aberto, foi fixado como “off”; e o parâmetro “Trim”, que influencia na altura do arco por meio da tensão, foi regulado em 1,25.

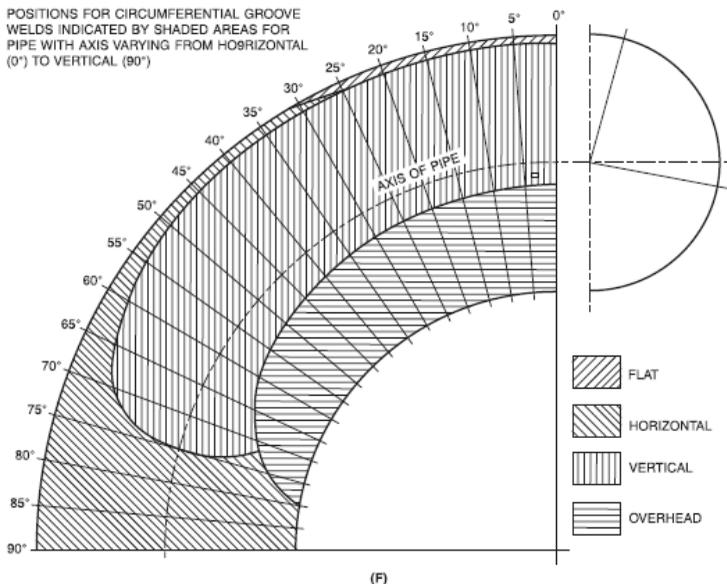


Figura 20 – Diagrama de posições de soldagem para tubos [58]

A ideia inicial seria manter a mesma V_a em todas as versões, inclusive no CMT. No entanto, o CMT age de uma forma diferente comparada com o CCC e o STT, pois atua ou no sentido de manter um valor constante de corrente média (I_m) ou no de manter a frequência de destacamento constante, o que quando há uma alteração na DBCP o sistema atua na variação da V_a . Algumas dessas características foram verificadas com a realização de simples depósitos sobre chapa, com diferentes ajustes de DBCP para uma mesma regulagem na fonte. Outro ponto observado nos ensaios preliminares foi a constatação de que a programação da V_a em 3,3 m/min implicou um valor de tensão extremamente baixo. Como consequência, o arco tendenciava ancorar apenas em um dos lados do chanfro, o que é resultado da baixa energia. Com isso, o arco não ancorava em toda a região do

chanfro e a poça não molhava nas suas paredes. Na máquina da *Fronius - Advanced 4000R*, o sinérgico utilizado foi o CMT “G3Si 1,2 mm - Ar CO₂”. A solução encontrada para fazer uma raiz manual de boa qualidade, e depois aplicá-la no sistema mecanizado, foi aumentar a Va de 3,3 m/min para 5,9 m/min, com o parâmetro “CA” em -10 – parâmetro este que atua no aumento ou na diminuição da frequência de destacamento.

Na realização da soldagem mecanizada foram mantidas as mesmas variáveis de movimento em todos os ensaios. A Tabela 2 mostra os valores utilizados. A distância do bico de contato até a peça (DBCP) foi regulada inicialmente em 17 mm, mas ocorreram variações ao longo da junta devido à ovalização do tubo e conseqüentemente do trilho, no qual percorre o manipulador robótico. Vale ressaltar que não foram utilizados sistemas para correção automática da DBCP, ficando esta apenas a cargo da percepção do operador.

Tabela 2 – Variáveis de movimento na soldagem com chanfro V

Velocidade de Soldagem (Vs): 16 a 19 cm/min
Amplitude de Tecimento (At): 3 mm
Frequência (f): 1,5 Hz
Tempo de Parada (tp): 100 ms
Ângulo de inclinação da tocha: 5° Puxando
DBCP: 17 mm
Perfil de Tecimento: Trapezoidal

Depois de ter variáveis de soldagem satisfatórias com o sistema mecanizado, definidos por testes preliminares, uma junta com cada versão de processo foi soldada para validação. Depois de soldada, realizou-se uma inspeção visual para análise dos cordões e, por fim, corte de macrografias nas três posições estipuladas, posição plana (PP); posição vertical descendente (PV); e posição sobrecabeça (SC), para análise interna do cordão e de suas condições geométricas de fusão no chanfro. Essa análise geométrica foi realizada com o auxílio do software de imagem *Image J*. A Figura 21 mostra os detalhes das medições realizadas com o referido software.

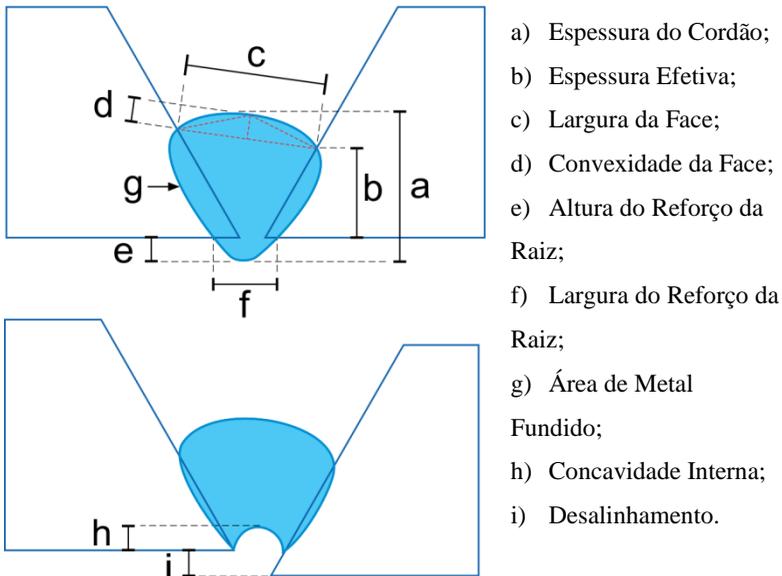


Figura 21 - Medições da raiz em chanfro

4.2 SOLDAGEM EM CHANFRO “U”

4.2.1 Materiais e equipamentos

No desenvolvimento da soldagem em chanfro U, foram utilizados tubos em aço de baixo teor de carbono de diâmetros e espessuras diferentes, conforme mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Tubos utilizados em ensaios com chanfro “U”

Especificação	Diâmetro [polegada]	Diâmetro [mm]	Espessura [polegada]	Espessura [mm]
API 5L – Grau B	18”	457,2	7/16”	11,1
API 5L – Grau B	16”	406,4	½”	12,7
API 5L X70 MS	22”	558,8	1 ¼”	31,7

O chanfro foi usinado utilizando-se uma chanfradeira (biseladora) hidráulica da marca Protém, mostrada na Figura 22. Um equipamento indispensável para a usinagem foi o *ID-Tracker* (*Internal Diameter – Tracker*), do inglês, “rastreador de diâmetro

interno”. Este dispositivo é um acessório que se integra à chanfradeira e apresenta um sistema de molas e rolamento, que permite a correção da posição da ferramenta durante a usinagem [28]. O diâmetro interno é rastreado pelo rolete, o qual, por interferência mecânica, desloca a ferramenta. Dessa maneira, a ferramenta é posicionada a partir da face interna do tubo e permanecerá sempre à mesma distância desta superfície; mantendo-se assim um valor geométrico, principalmente de nariz, praticamente uniforme em toda a circunferência. A ovalização dos tubos, neste caso, não interfere no processo de usinagem.

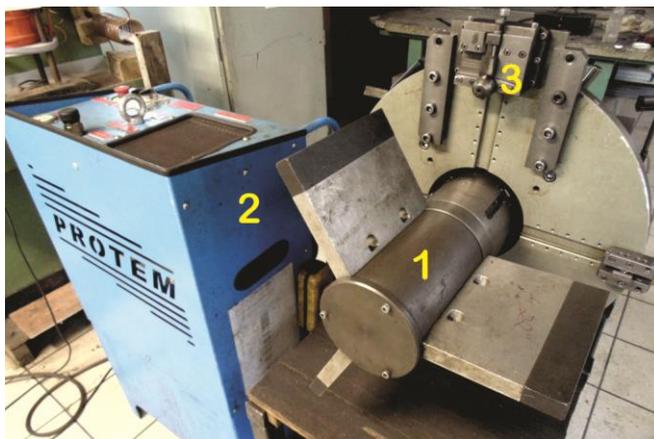
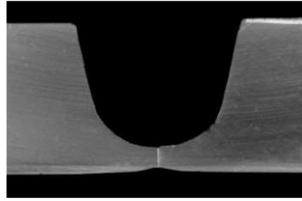
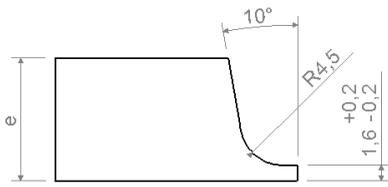


Figura 22 – 1) Chanfradeira/Biseladora; 2) Unidade Hidráulica; 3) ID Tracker

Na operação de usinagem, seções de tubos de aproximadamente 250 mm tiveram, primeiramente, suas extremidades faceadas, para posterior utilização da ferramenta de usinagem com perfil “J”. Em todas as espessuras dos tubos, o bisel, mostrado na Figura 23, foi usinado com o mesmo valor de ângulo de inclinação e espessura de nariz.

As duas fontes de soldagem utilizadas nos ensaios em chanfro U foram a IMC - Digiplus A7 com a versão CCC, e a *Fronius CMT Advanced 4000R* com a versão CMT. Em ambos os equipamentos, o sistema de manipulação da tocha utilizado foi o Tartilope V3. A bancada completa de ensaios, com a fonte da IMC e os sistemas de manipulador robótico, são detalhados na Figura 24.



a)

b)

Figura 23 - a) Bisel em J padrão na soldagem dos ensaios; b) Montagem chanfro U [28]



Figura 24 - Bancada de Ensaio: 1 - Fonte de energia; 2 - Cabeçote alimentador de arame; 3 - Tubo; 4 - Trilho do manipulador; 5 - Manipulador da tocha; 6 - Unidade de controle do manipulador; 7 - IHM; 8 - SAP

Para todos os ensaios, foi empregado um único tipo de metal de adição, o ER 70S-6 com 1,2 mm de diâmetro, e um único gás de proteção, a mistura C 25 (75% Ar, 25% CO₂). O que variou foi a vazão de gás; sendo que, para tubos de espessuras menores, usou-se 15 L/min, e para o tubo de espessura maior,

uma vazão de 25 L/min. Isso foi necessário para se obter uma solda isenta de poros devido à proteção gasosa.

4.2.2 Metodologia

Definiu-se, como metodologia inicial, a tentativa de repetibilidade das variáveis de soldagem dos ensaios realizados em chanfro V explanados na seção 4.1.2, tanto para as variáveis de movimentação da tocha, quanto para as variáveis na fonte de soldagem com a versão CCC. Em nenhum momento, as variáveis da fonte foram alteradas para os ensaios iniciais, por se tratarem de valores estáveis. Esses valores estão demonstrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Variáveis da fonte de soldagem - chanfro U – Tubos 18”

Versão de Processo MIG/MAG:	CCC – “Aço carbono C25 1,2 mm”
Velocidade de Arame (Va):	3,3 m/min
Variável “a”:	30
Cta:	1,0
Ckr:	0,0

Em razão de o equipamento de usinagem para o chanfro U estar disponível apenas para tubos, todos os testes iniciais e ensaios de validação foram realizados diretamente em tubos de 18” de diâmetro.

Com relação à espessura do nariz do chanfro, valor extremamente importante no procedimento, os primeiros valores adotados levaram em conta simples ensaios manuais sobre chapas, o que possibilitou verificar a penetração total do metal fundido em 2 mm.

Logo no início, verificou-se a necessidade de alterações das variáveis do procedimento e também do chanfro, permitindo que, ao longo do trabalho, os testes com a versão CCC chamados aqui de UT – CP e os ensaios para validação, chamados de U – CP, fossem sendo adaptados conforme a necessidade.

Diante dos bons resultados obtidos e validados em alguns ensaios em tubos de 18”, a segunda etapa foi realizada com ensaios nas mesmas condições de variáveis de movimentação da tocha, ou seja, os procedimentos realizados com CCC, que

apresentaram boa repetibilidade e robustez, foram realizados com a versão CMT. As variáveis elétricas reguladas na fonte da *Fronius* estão explanadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Variáveis da fonte de soldagem - chanfro U – Tubos 18”

Versão de Processo MIG/MAG:	CMT – “G3Si 1,2 mm - Ar CO ₂ ”
Velocidade de Arame (Va):	5,9 m/min
Variável “CA”	20

Subsequentemente, para uma análise de verificação da robustez do procedimento, as mesmas variáveis de soldagem adotadas com a versão CCC nos tubos de 18” com chanfro “U” foram submetidas a ensaios em tubos de diferentes diâmetros e diferentes espessuras, tubos esses apresentados na seção 4.2.1. Por fim, todos os diâmetros de tubos utilizados foram soldados com a versão CCC em mesmos valores de velocidade de alimentação de arame (Va) e também com ensaios em diferentes valores de Va, com o objetivo de se aumentar a taxa de deposição do arame e realizar uma comparação mais coerente com o CMT.

Como a soldagem com a versão CMT em chanfro “U” foi realizada apenas com o tubo de 18”, realizou-se a comparação da geometria de metal fundido entre as duas versões CCC e CMT, na qual foram soldados ambos com a Va real de 4,4 m/min – análise realizada com o SAP.

Diversas amostras extraídas de diferentes posições dos tubos PP (1h), PV (3h), SC (5h), soldados com CCC e CMT, passaram por análises macrográficas, com o objetivo de se investigar a geometria do metal fundido em relação ao metal de base e a presença de descontinuidades internas. Medições dos detalhes geométricos das soldas foram realizadas utilizando os mesmos critérios utilizados nos ensaios para o chanfro “V”, especificados na Figura 21.

5 VERIFICAÇÃO DE MOVIMENTO TARTÍLOPE V3

A verificação é uma forma de calibração simplificada com o objetivo de testar se a medida materializada está em conformidade com a especificação regulada no equipamento [59].

Na soldagem, os procedimentos são compostos de variáveis da fonte – que irão registrar valores de corrente, tensão e velocidade de alimentação de arame (V_a), os quais neste trabalho foram verificados pelo SAP – e variáveis de movimento regulados no manipulador robótico Tartílope V3.

Este capítulo mostra métodos de verificação dos movimentos do equipamento Tartílope V3. Esses valores são importantes para determinar a confiabilidade do manipulador no decorrer dos ensaios de soldagem.

5.1 METODOLOGIA DE VERIFICAÇÃO

Variáveis de entrada como V_s [cm/min], A_t [mm], f [Hz] e t_p [ms] são ajustados na IHM do manipulador, e o mínimo esperado é a conformidade dos valores regulados com os valores reais. No intuito de verificar esses valores, uma série de ensaios foi realizada utilizando-se alguns métodos: filmagem, análise de imagem do osciloscópio, análise com sensor de deslocamento e método da V_s .

Para análise do eixo y do manipulador, que está atrelado à A_t , f e t_p , os ensaios foram executados com os métodos sendo adquiridos ao mesmo tempo. A Figura 25 mostra a disposição de equipamentos nesses ensaios.

A primeira metodologia de ensaios consistiu em verificar a A_t , f e t_p , ajustando na IHM as variáveis e realizando a movimentação no eixo y em posições diferentes no tubo: PP, PV e SC. O ensaio foi feito com o Tartílope V3 parado na direção longitudinal (eixo x) em cada posição. Nos três métodos de ensaio, duas condições foram atribuídas: uma com a tocha mais pesada, utilizada nos ensaios de soldagem e anexada ao manipulador; e outra sem a tocha. A Tabela 6 mostra os valores de entrada na IHM.

A segunda metodologia foi realizada apenas para o método de análise de imagem do osciloscópio e análise com o método com sensor de deslocamento. O ensaio consistiu em executar as medições nas duas situações, com e sem tocha; porém, ao

contrário da primeira metodologia, esta segunda metodologia foi realizada com o Tartílope em movimento longitudinal (eixo x). Esse valor do eixo “x” correspondente a V_s . Para essa metodologia, o ensaio da filmagem não foi possível de ser realizado devido à dificuldade de foco de imagem com o sistema em deslocamento na longitudinal. Os valores de entrada estão representados na Tabela 7.

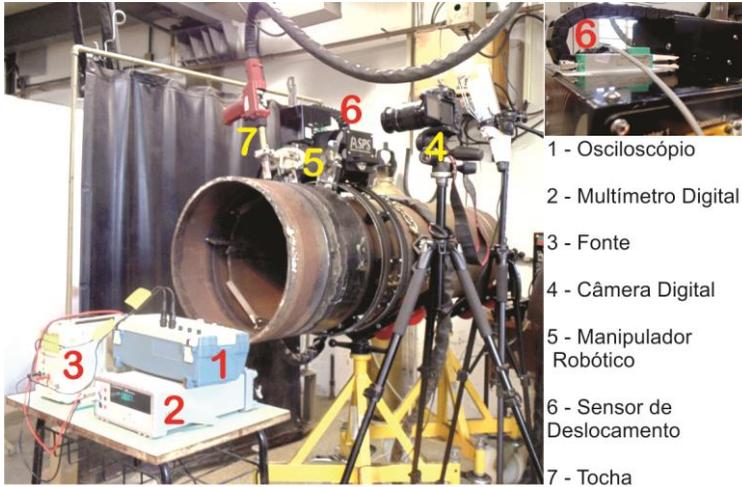


Figura 25 - Bancada de ensaios para verificação de movimentos do Tartílope V3

Tabela 6 – Valores de entrada IHM – Tartílope V3 parado

	Posição	At [mm]	f [Hz]	tp [ms]
Com Tocha	PP	4,0	1,4	100
	PV	4,0	1,4	100
	SC	4,0	1,4	100
	PP	4,0	1,4	200
	PV	4,0	1,4	200
	SC	4,0	1,4	200
Sem Tocha	PP	4,0	1,4	100
	PV	4,0	1,4	100
	SC	4,0	1,4	100
	PP	4,0	1,4	200
	PV	4,0	1,4	200
	SC	4,0	1,4	200

Tabela 7 - Valores de entrada IHM – Tartilope V3 em movimento

	Posição	At [mm]	f [Hz]	tp [ms]	Vs [cm/min]
Com Tocha	PP	4,0	1,4	200	28
	PV	4,0	1,4	200	28
	SC	4,0	1,4	200	28
Sem Tocha	PP	4,0	1,4	200	28
	PV	4,0	1,4	200	28
	SC	4,0	1,4	200	28

Para o método da Vs, simples marcações de uma distância conhecida foram feitas no trilho do manipulador, percorrendo desde a posição PP até SC, e, com um cronômetro digital, marcou-se o tempo. Para todas as Vs reguladas na IHM, três deslocamentos na progressão descendente foram realizados. Os valores de entrada são mostrados na Tabela 8. Nesse caso, ambos os ensaios foram feitos com a tocha acoplada ao manipulador.

Tabela 8 - Dados de entrada para método da Vs

Distância Percorrida [cm]	Vs [cm/min]	At [mm]	f [Hz]	tp [ms]
110	28	4,0	1,4	100
110	30	4,0	1,4	100
110	32	4,0	1,4	100

Todos os ensaios foram realizados no Tartilope V3 com o perfil de movimentação triangular, que foi o mais utilizado nos ensaios em geral; além do fato de ser o perfil determinante no acerto para procedimento da soldagem de raiz em chanfro U.

5.1.1 Método da filmagem

Para o método da filmagem, algumas etapas foram realizadas, assim como a utilização de equipamentos e softwares de tratamento de imagens.

Primeiramente, foi feita a aquisição da filmagem utilizando uma câmera digital Canon EOS 60D, com lente de 18-138 mm. A taxa de aquisição de imagens foi de 60 fps (quadros por segundo) com resolução em HD de 1280 x 720. Na filmagem,

utilizou-se um adesivo com escala e vários pontos de referência colados no sistema de deslocamento e do Tartflope V3.

Após as filmagens, a conversão do vídeo em imagens foi realizada com o software *Adobe Premiere*. Como etapa seguinte, carregou-se a sequência de imagens com o software *Motion Studio* e, com a função *Tracking*, rastreou-se o movimento de um dos marcadores selecionados previamente. A escala do adesivo serviu como referência de calibração para a função de rastreamento. A Figura 26 mostra a interface do software *Motion Studio* com a imagem do ensaio.

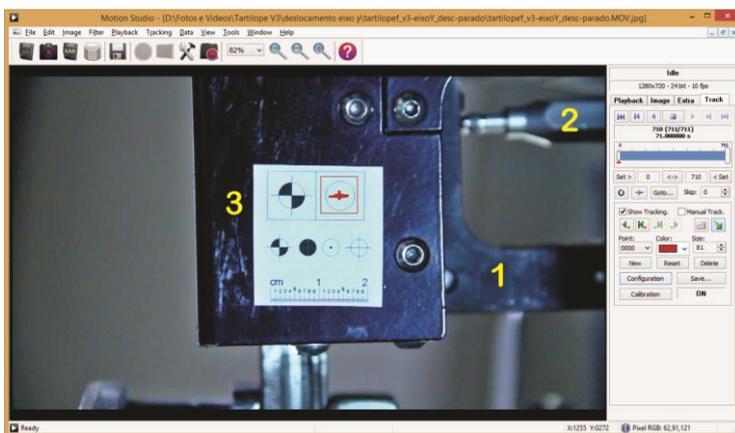


Figura 26 - Imagem *Motion Studio*; 1- Eixo y e Tartflope V3; 2- Sensor de deslocamento linear; 3- Adesivo de referência

O software rastreia o deslocamento e gera dados para a montagem de gráficos para posterior análise, os quais foram plotados com o software *Microsoft Excel*.

5.1.2 Método de análise com sensor de deslocamento e método de imagem do osciloscópio

Ambos os métodos que serão apresentados nesta seção exigiram o uso da mesma estrutura de equipamentos. Foram utilizados um osciloscópio digital Tektronix TPS 2024, multímetro digital Agilent Technologies U3401A, sensor de deslocamento linear Buster 8713 e uma fonte de alimentação Icel PS-4100.

O sensor foi fixado em um ponto estratégico do eixo y do manipulador robótico, evitando vibrações e oscilações que interferissem na medida e também com a finalidade de ajustar o curso de deslocamento de sua haste com margem de segurança suficiente.

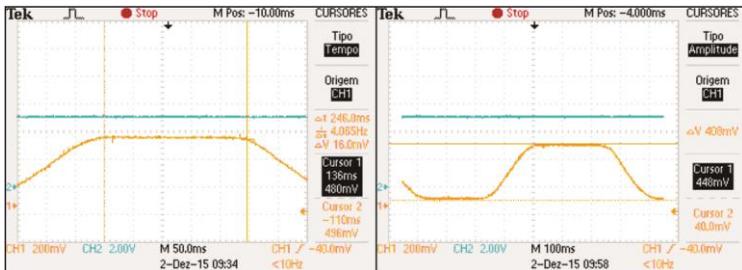
Esse sensor de deslocamento é um dispositivo baseado em um filme resistivo com variação linear e proporcional em relação ao deslocamento. Seu curso total é de 54,4 mm e resolução 0,1 mm, o qual foi medido antes da realização do ensaio com o multímetro digital de bancada, para avaliar a resistência e seu curso linear.

Para a execução dos ensaios, conectou-se a alimentação do sensor de deslocamento e regulou-se uma tensão da fonte de 5 V, usando o multímetro para aferição. Ao mesmo tempo, foi conectada uma das ponteiros do osciloscópio em paralelo com o sinal de saída do sensor e a outra em paralelo com a alimentação do sensor. Com o objetivo de redução de ruído de sinal, um filtro leve (capacitor de 1,2 nF) foi instalado na saída do sensor.

Com todo o aparato em pleno funcionamento, e todos ajustados devidamente, a execução dos ensaios foi realizada. O osciloscópio detecta os sinais de tensão gerados pelo movimento do sensor e plota um gráfico bidimensional da diferença de potencial em uma base de tempo. Para a verificação das medições com osciloscópio, de modo a minimizar a ocorrência de possíveis erros, recorreu-se a uma amostragem de um ciclo completo de deslocamento na tela. Isto facilitou na inserção de cursores para a verificação da amplitude e do tempo de deslocamento.

Os cursores posicionados serviram de referência para o método de imagem do osciloscópio, como mostra a Figura 27. Já o método da análise com o sensor foi realizado mediante dados salvos no osciloscópio e posterior tratamento gráfico com *Microsoft Excel*.

O multímetro foi usado o tempo todo no monitoramento da tensão de alimentação do sensor, juntamente com o canal do osciloscópio.



a) b)
Figura 27 - Imagem Osciloscópio - a) Cursores posicionados na amplitude; b) Cursores posicionados na base de tempo

5.2 RESULTADOS DAS VERIFICAÇÕES DA MOVIMENTAÇÃO DO TARTÍLOPE V3

A repetibilidade e robustez de um procedimento de soldagem estão diretamente ligadas à confiabilidade das variáveis de soldagem que são entregues pelos equipamentos. Com esse objetivo de verificação, ensaios com diferentes métodos foram executados para o manipulador robótico Tartílope V3.

De acordo com a primeira metodologia descrita na seção 5.1, foram investigados apenas os movimentos do eixo y do manipulador robótico, sem o movimento longitudinal ($V_s = 0$). Para o método da imagem do osciloscópio e o método da análise gráfica do sensor, o valor da diferença de potencial registrado no gráfico está atrelado à amplitude de tecimento (A_t), enquanto a base de tempo está atrelada ao tempo de parada (t_p) do eixo y em cada extremidade do seu movimento. Nesse ensaio, foi verificado apenas um ciclo de movimentação do eixo y, o qual foi registrado no osciloscópio. Para o método da filmagem, por intermédio da plotagem de gráficos a partir dos dados gerados, foi feita uma investigação mais criteriosa com vários pontos, calculando-se a média ao final. Isso foi possível porque, no método da filmagem, com o manipulador movimentando em certo tempo, adquiriram-se dados suficientes para gerar um gráfico com vários ciclos, o que não foi realizado com o osciloscópio. As Tabela 9, Tabela 10 e Tabela 11 trazem os valores das verificações.

Devido ao fato de os ensaios com osciloscópio, em alguns casos, terem se utilizado de um aumento no tamanho do ciclo na tela, como verificado na Figura 27, com a finalidade de melhorar o posicionamento e a precisão dos cursores, a medição de um

ciclo completo ficou impossibilitada. Com isso, não foi aplicada (NA) a verificação da frequência (f). Nos casos em que foi realizada a verificação da f , o valor colocado na IHM mostrou ficar próximo do verificado nos ensaios, com pouca variação: menos de 0,1 Hz.

Tabela 9 – Valores obtidos pelo método da filmagem (análise gráfica) com Tartilope V3 parado

	Posição	At [mm]	tp [ms]	f [Hz]
Com tocha	PP	4,1	110	1,4
	PV	3,9	115	1,3
	SC	3,9	108	1,3
	PP	4,1	200	1,3
	PV	4,0	200	1,2
	SC	3,8	220	1,2
Sem tocha	PP	3,9	108	1,4
	PV	4,0	110	1,3
	SC	3,7	133	1,3
	PP	4,1	216	1,3
	PV	3,9	217	1,3
	SC	3,8	216	1,3

Tabela 10 – Valores obtidos pelo método do sensor de deslocamento (análise gráfica) com Tartilope V3 parado

	Posição	At [mm]	tp [ms]	f [Hz]
Com tocha	PP	4,0	125	1,3
	PV	4,1	109	1,3
	SC	3,9	131	1,3
	PP	4,3	230	NA
	PV	4,3	229	NA
	SC	4,0	254	NA
Sem tocha	PP	3,9	123	1,3
	PV	3,9	117	1,3
	SC	3,8	140	1,3
	PP	4,2	232	NA
	PV	4,1	236	NA
	SC	4,1	241	NA

Nota: NA – Não Aplicado

Considerando a filmagem como o método mais confiável, a partir do valor ajustado na IHM de 4,0 mm para a At, percebeu-se uma variação de -0,3 mm a 0,1 mm. No método do sensor,

variou-se de -0,2 mm a 0,3 mm e, para o método da imagem do osciloscópio, de -0,1 mm a 0,4 mm.

Tabela 11 – Valores obtidos pelo método de imagem do osciloscópio com Tartilope V3 parado

	Posição	At [mm]	tp [ms]	f [Hz]
Com tocha	PP	4,3	126	NA
	PV	4,0	128	NA
	SC	4,2	134	NA
	PP	4,4	268	NA
	PV	4,4	246	NA
	SC	4,2	256	NA
Sem tocha	PP	4,2	120	NA
	PV	4,2	120	NA
	SC	3,9	140	NA
	PP	4,4	246	NA
	PV	4,3	248	NA
	SC	4,3	246	NA

Nota: NA – Não Aplicado

A investigação com relação ao tp, o qual apresenta variações em maiores ordens numéricas, foi feita mais no sentido de realmente verificar se a parada estava ocorrendo com a alteração no valor da IHM. Como foi observado nos ensaios, em todos os métodos houve a variação, principalmente quando se alterou o valor de 100 ms para 200 ms. Se a variação é de 50 ms, como ocorreu em alguns casos, torna-se praticamente desprezível devido à unidade ms, que é pequena e deve ser absorvida para qualquer procedimento de soldagem robusto.

Na segunda metodologia aplicada, replicou-se uma situação mais próxima da real, com o manipulador deslocando longitudinalmente com Vs de 28 cm/min. Entretanto, o ensaio pelo método da filmagem não foi possível de ser realizado nessa condição, devido à dificuldade no ajuste do foco da filmadora. Portanto, apenas os ensaios com o método de imagem do osciloscópio e análise de dados do osciloscópio foram executados. A Tabela 12 e a Tabela 13 fornecem os resultados da análise.

Os dois métodos realizados mostraram-se eficazes para esse tipo de verificação, mesmo com o manipulador em movimento. Valores aproximados, no que diz respeito às variáveis observadas no ensaio da primeira metodologia, com o

manipulador parado, repetiram-se nessa segunda metodologia com o manipulador em movimento.

Tabela 12 – Valores obtidos pelo método do sensor de deslocamento com Tartilope V3 deslocando a $V_s = 28$ cm/min

	Posição	At [mm]	tp [ms]
Com tocha	PP	4,3	242
	PV	4,3	226
	SC	4,0	262
Sem tocha	PP	4,0	229
	PV	4,1	240
	SC	40	241

Tabela 13 – Valores obtidos pelo método de imagem do osciloscópio com Tartilope V3 deslocando a $V_s = 28$ cm/min

	Posição	At [mm]	tp [ms]
Com tocha	PP	4,4	246
	PV	4,4	242
	SC	4,2	258
Sem tocha	PP	4,3	242
	PV	4,3	254
	SC	4,2	248

Na sequência, gráficos da Figura 28 mostram uma característica importante observada em ambos os métodos. Observou-se que o comportamento da variação de medida segue uma tendência de diminuir o valor da At na posição SC, em comparação às outras posições, nas quais a tendência é praticamente linear. Isto aconteceu em três casos analisados em todos os métodos, tanto em ensaios com e sem tocha, quanto com o manipulador parado e em movimento. O valor dessa variação é em torno de 10 %.

No método da V_s , os simples ensaios realizados trouxeram resultados que comprovaram a confiabilidade do manipulador também com relação ao deslocamento longitudinal (eixo x). O gráfico da Figura 29 detalha o comportamento real da V_s em três repetições de ensaios.

Para diferentes V_s selecionadas na IHM, compatíveis com as V_s utilizadas nos ensaios em chanfro U, o gráfico apresenta pouca variação entre os ensaios: menor que 1 cm/min. Cada ensaio na progressão descendente foi executado três vezes.

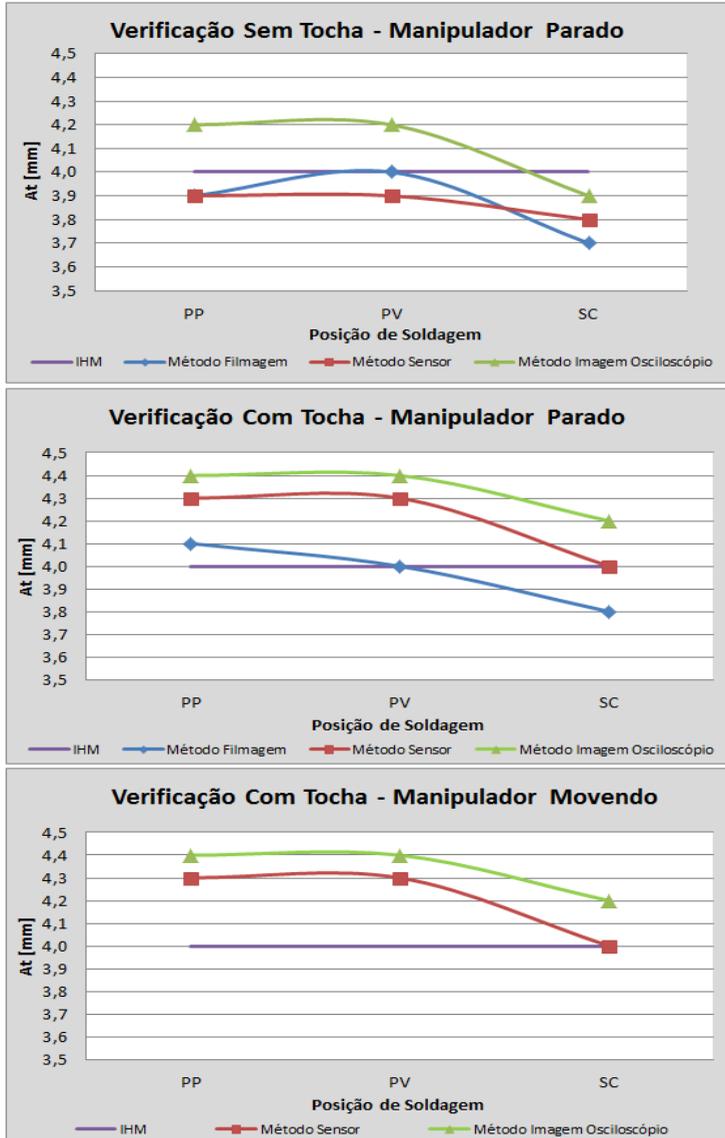


Figura 28 - Gráficos de verificação do Tartilope V3 – relação amplitude de tecimento versus posição de soldagem no tubo

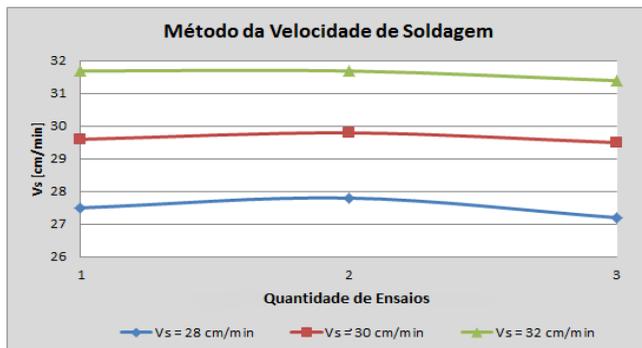


Figura 29 - Gráfico do método da velocidade de soldagem

Diante dos fatos abordados, os resultados mostraram que o manipulador robótico Tartlope V3 utilizado demonstrou boa resposta dinâmica às variáveis definidas. O valor ajustado na IHM não apresentou muitas variações com relação ao valor real das medidas, concluindo-se pela confiabilidade do equipamento. Quando aplicadas à soldagem, essas pequenas variações não trazem perturbações consideráveis que possam afetar o procedimento. Caso ocorresse alguma descontinuidade, o que deveria supri-la seria a robustez do procedimento de soldagem e não os valores mínimos de variação que o manipulador impõe.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES DOS ENSAIOS DE SOLDAGEM

Este capítulo retrata os resultados e as discussões dos ensaios de soldagem mecanizada realizada tanto para o chanfro “V” como para o chanfro “U” com as versões MIG/MAG em curto-circuito com controle de corrente. Os materiais e metodologias referentes aos ensaios foram descritas no capítulo 4.

6.1 RAIZ EM CHANFRO “V”

6.1.1 Análise do procedimento

A fim de atingir os objetivos da pesquisa, algumas análises quantitativas e qualitativas foram realizadas: a verificação de cada versão com relação ao comportamento do arco dentro do chanfro, o comportamento da poça ao longo das posições de soldagem, o ponto de contato do arame em relação à poça e a estabilidade do processo.

Um importante ponto a ser considerado é a relação do ancoramento do arco com o chanfro. Na versão CMT, quando estabelecido na fonte de soldagem uma velocidade de arame (V_a) de 3,3 m/min, o valor da tensão registrada no painel indicador da fonte foi de apenas 12 V. Nessa situação, o arco ancorava apenas em um dos lados do chanfro. Foi observado que o arco tende a seguir em uma região mais favorável à passagem da corrente, fazendo com que a poça de fusão não tenha atuação precisa em ambos os lados do chanfro. Ficou evidenciado que, para a situação de chanfro proposta, essa regulagem de variáveis foi impossível de ser utilizada.

Outro ponto importante analisado no programa sinérgico da versão CMT foi a variação da V_a devido à variação da DBCP. O sistema adaptativo funciona mantendo sua transferência em curto-circuito ou a Im em valores constantes, independentemente do aumento ou diminuição da DBCP ao longo do percurso da solda no tubo. O que varia é a V_a , na qual o sistema adaptativo atua a fim de que não sejam alteradas as variáveis citadas acima e de que seja mantida a relação da taxa de fusão do arame. Os valores de V_a impostos como valor de entrada na fonte não obedecem ao valor de referência, o que não torna factível ao

operador regular o equipamento com base nessa informação. Em sua tese, Pépe [36] mostra esta variação em ensaio com a versão CMT, na qual regula uma V_a de 7,8 m/min, mostrada na Figura 30. É exposto no gráfico um comportamento praticamente linear dessa variação, no qual foi observado que, em função da variação da DBCP, tem-se a variação de V_a para compensar a ação do efeito Joule na taxa de fusão do arame, e assim, não alterar a I_m ou a frequência de destacamento.

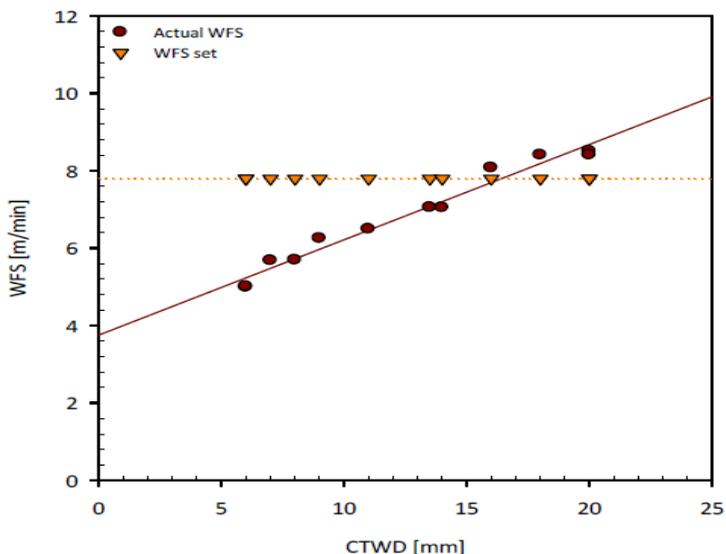


Figura 30 – Comportamento da variação de V_a pela alteração da DBCP - versão CMT [36]

Na Figura 31, em ensaios realizados sobre chapas, comprovou-se a análise realizada por Pépe. Porém, nesse caso, utilizou-se a mesma V_a usada nos ensaios deste trabalho, nos quais foi regulado 5,9 m/min de V_a para a versão CMT.

Em outro ensaio realizado com a versão CMT nas mesmas condições das variáveis reguladas no ensaio citado acima, propositalmente, variou-se bruscamente a DBCP em um robô antropomórfico, no qual houve alternância de altura em um único cordão de solda sobre chapa, por um tempo de 30 s. Observa-se o comportamento do alimentador de arame nessa situação de variação, exposto no gráfico da Figura 32, na qual foi registrada a

Va com o transdutor de velocidade de alimentação de arame do SAP.

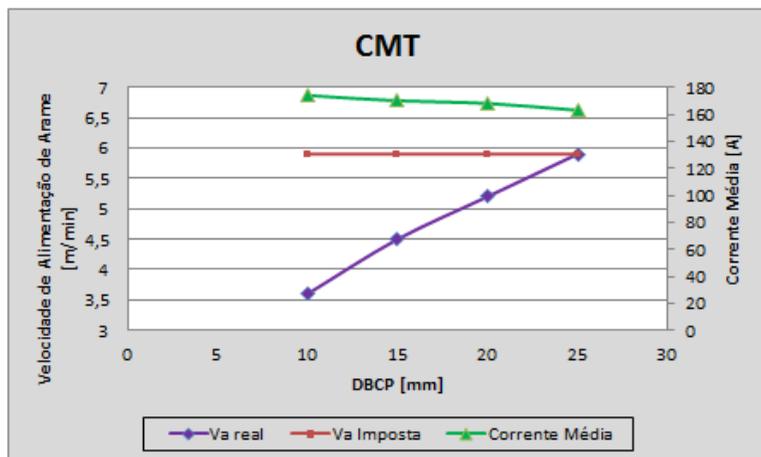


Figura 31 - Gráfico da relação da variação de Va pela alteração da DBCP - versão CMT

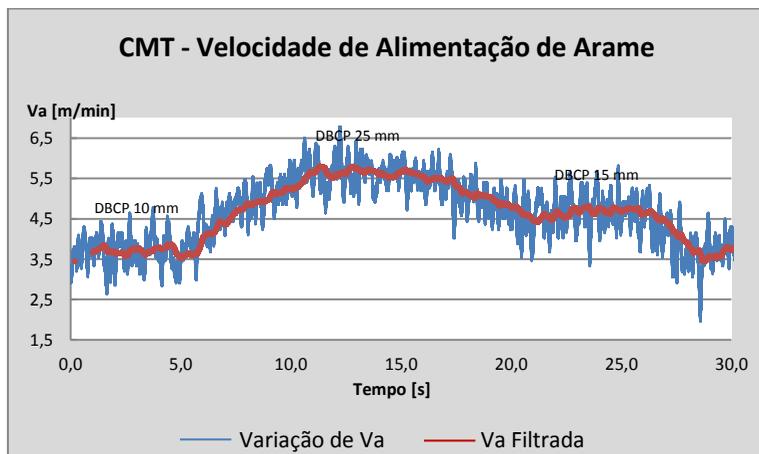


Figura 32 - Gráfico de Va registrada por transdutor

Com relação às versões CCC e STT, o comportamento do sinérgico é similar entre si, de maneira que a variação da DBCP mantém a Va constante. Nesses casos, a variável que altera, para compensar o efeito Joule na taxa de fusão do arame, é a Im. A

Figura 33 mostra essa variação em ensaio com a versão CCC e a V_a regulada em 3,3 m/min.

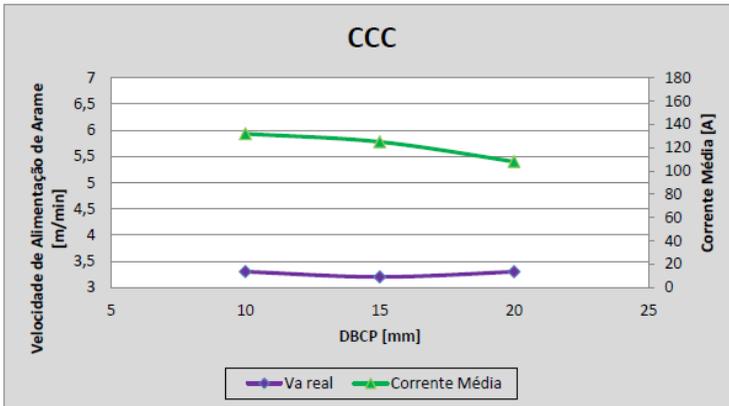


Figura 33 - Gráfico da relação da variação de I_m pela alteração da DBCP – versão CCC

Nessa situação, percebeu-se a não linearidade da variação, havendo uma queda mais contundente da I_m na variação da DBCP entre 15 mm e 20 mm.

A soldagem orbital em tubos apresenta diferentes posições ao longo de seu perímetro; e, com isso, foi necessário que a variação da velocidade de soldagem (V_s) fosse alterada devido ao escorrimento da poça de fusão. Para todas as versões, essa variação aconteceu principalmente na posição vertical descendente. O operador do equipamento de soldagem mecanizada, mediante sua percepção visual, ajustou a V_s do equipamento no sentido de manter as gotas destacando no centro da poça. Essa é a condição mais favorável de funcionamento das versões em curto-circuito com controle de corrente, com o objetivo de concentrar energia na poça para obter a penetração requerida.

No decorrer da soldagem, as três versões apresentaram bons resultados quanto à estabilidade da transferência, os quais foram verificados em análises de oscilogramas. As Figura 5, Figura 6 e Figura 9 mostram parte dessa estabilidade que se repetiu ao longo de toda a soldagem. Em uma análise qualitativa durante os ensaios, a quantidade de respingos foi mínima – uma das características do bom funcionamento dessas versões.

6.1.2 Análise das soldas

Primeiramente, uma avaliação visual dos cordões de solda foi feita com o intuito de verificar a existência de descontinuidades que os comprometessem. Descontinuidades comuns em normas, tais como penetração incompleta, concavidade excessiva da raiz, penetração excessiva da raiz, perfuração, poros superficiais, mordeduras e falta de fusão não foram observadas nos cordões. A Figura 34 mostra a face e a raiz obtida em cada versão de processo.

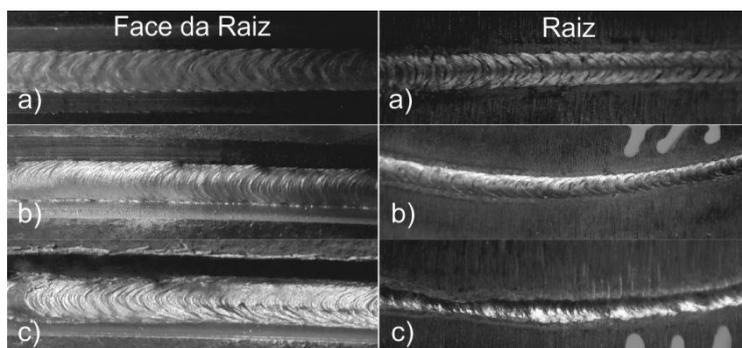


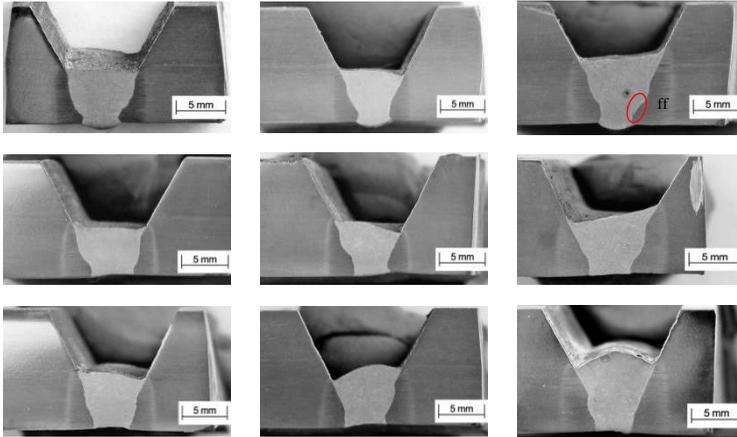
Figura 34 - Cordão de raiz em ensaio de validação do chanfro V - (a) CCC; (b) STT; (c) CMT

Para uma análise mais detalhada do perfil geométrico do metal fundido e uma melhor condição de visualização das descontinuidades, macrografias mostradas na Figura 35 foram preparadas. Para cada posição de soldagem, plana (PP), vertical descendente (PV) e sobrecabeça (SC), foram cortadas amostras em uma mesma referência pontual nos tubos.

Nos resultados, apenas a versão CMT mostrou não atender plenamente às condições exigíveis em normas. Na amostra da posição plana, mostrada na Figura 35 (c), além do poro identificado no centro do metal fundido, o que pode ser uma condição esporádica, a falta de fusão (ff) é perceptível em um dos flancos do chanfro, comprometendo a integridade da raiz por ser um concentrador de tensões.

Embora as versões STT e CMT na posição sobrecabeça tenham apresentado convexidade excessiva na superfície da raiz, o que não é considerado defeito perante as normas, os demais

resultados mostraram-se de boa qualidade; principalmente no que concerne às versões CCC e STT, nas quais, em todas as posições do tubo, obteve-se boa fusão nos flancos do chanfro.



a) b) c)
Figura 35 - Macrografias a) CCC - PP, PV, SC respectivamente b) STT - PP, PV, SC respectivamente c) CMT - PP, PV, SC respectivamente

Outro ponto analisado foi em relação ao modo como a alteração do comportamento da poça de fusão, ao longo das posições do tubo, influenciou em um perfil solidificado diferente à cada posição, porém, similar entre as versões. Na posição plana, é nítida a presença de reforço de raiz. Para a posição vertical descendente e sobrecabeça, a raiz ficou com aspecto semelhante; entretanto, em alguns casos, uma pequena concavidade interna ocorreu em relação ao tubo.

No que concerne à espessura de metal depositado, nas versões CCC e STT, foi constatada a similaridade de valores. O CMT, em decorrência do aumento da V_a em 5,9 m/min, resultando em uma V_a real de 4,7 m/min, obteve uma maior espessura depositada. Como efeito natural do programa sinérgico do CMT, valores de corrente e tensão aumentaram indiretamente em virtude da regulagem de V_a para compensar a taxa de fusão. Os detalhes na medição das macrografias foram realizados como mostrado na Figura 21 e são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Valores chanfro V

Versão de Processo	Posição [h]	Espessura Cordão [mm]	Espessura Efetiva [mm]	Largura Face [mm]	Convexidade Face [mm]	Altura Reforço da Raiz [mm]	Largura do Reforço da Raiz [mm]	Concavidade Interna [mm]	Desalinamento [mm]	Área de Metal Fundido [mm ²]
CCC	11	6,4	5,4	7,5	0,0	0,8	4,1	0,0	0,0	34,8
	9	5,2	5,1	8,1	0,0	0,0	4,8	0,2	0,3	33,2
	7	5,6	4,9	7,7	0,3	0,0	4,1	0,3	0,0	32,2
STT	11	6,0	4,7	7,4	0,0	0,6	4,0	0,0	0,0	28,6
	9	5,7	4,1	7,4	0,6	0,0	4,0	0,0	0,5	27,9
	7	6,3	4,7	7,8	1,0	0,0	4,6	0,3	0,5	35,5
CMT	11	7,5	6,4	9,0	0,0	0,8	3,5	0,0	0,0	42,1
	9	6,4	5,7	9,1	0,0	0,0	4,0	0,0	0,0	39,5
	7	8,1	6,4	8,4	1,5	0,0	3,2	0,2	0,0	43,8

Por fim, a compilação de dados das variáveis elétricas e o valor real medido da velocidade de arame são expostos na Tabela 15. Essas medidas representam a média dos valores instantâneos aquisitados.

Tabela 15 - Chanfro V – Dados aquisitados com SAP

Versão de Processo	Posição	Um [V]	Im [A]	P [W]	Va [m/min]
CCC	Plana - 11h	16,1	122,0	1911,0	3,4
	Vertical - 9h	16,4	119,0	1914,0	3,4
	Sobre cabeça - 7h	16,8	113,0	1919,0	3,4
STT	Plana - 11h	15,6	123,0	1798,0	3,4
	Vertical - 9h	15,3	126,0	1826,0	3,5
	Sobre cabeça - 7h	15,3	126,0	1862,0	3,4
CMT	Plana - 11h	14,8	158,0	2673,0	4,8
	Vertical - 9h	14,8	160,0	2708,0	4,7
	Sobre cabeça - 7h	14,7	161,0	2745,0	4,7

Os valores das variáveis elétricas e da V_a das versões CCC e STT são semelhantes, o que torna a comparação mais coerente, principalmente ao que foi exposto nas macrografias da Figura 35 com relação ao perfil geométrico de metal fundido. A versão CMT, no entanto, registrou em ferramenta de aquisição uma velocidade de arame maior: em torno de 4,7 m/min. Isso explica a maior área de metal fundido depositada, mostrada na Tabela 14, a qual obteve uma variação em torno de 20% a 35% a mais em relação às outras versões, dependendo da posição de soldagem no tubo. Ademais, uma maior potência e maior corrente média foram registradas, o que é coerente para uma maior taxa de fusão do arame.

Mesmo assim, o procedimento com a versão CMT acabou ficando suscetível à falta de fusão nos flancos do chanfro. Uma hipótese levantada disso pode ser referente ao mecanismo de transferência das gotas dessa versão. Observou-se, na comparação dos oscilogramas das Figura 5, Figura 6 e Figura 9, que o tempo em curto do CMT é relativamente maior que o tempo em curto das outras versões, variando de 3 ms do CCC e STT para 7 ms do CMT. Na avaliação do tempo relativo em curto, versus o período total, o CMT fica em torno de 45 % em curto. Já as versões CCC e STT esse valor é em torno de 15 %. A comparação entre as versões CCC e CMT pode ser observada na Figura 36. Com isso, quando estiver em curto-circuito, há a extinção do arco - o que não contribuirá de forma significativa para a condução de calor no metal de base. Nesse período em curto, o principal efeito que ocorre é o aquecimento do arame por efeito Joule. Essa ocorrência em uma elevada frequência (70 Hz para o CMT) tende a deixar a poça mais fria. Associado a isso, o fato de a tensão superficial atuar no sentido contrário à ação da penetração a cada evento de destacamento da gota, em função do sistema de retração do arame, gera uma tendência à falta de fusão.

Comparando a relação potência versus V_a , foram feitos os cálculos com os dados da Tabela 15 para cada versão: CCC – 562 W/(m/min); STT – 537 W/(m/min); CMT – 576 W/(m/min). Analisando os resultados, verificou-se que o CMT, mesmo com valores de potência relativa versus V_a um pouco maiores, comparados aos das outras versões, tendenciou gerar falta de fusão nos flancos do chanfro “V”.

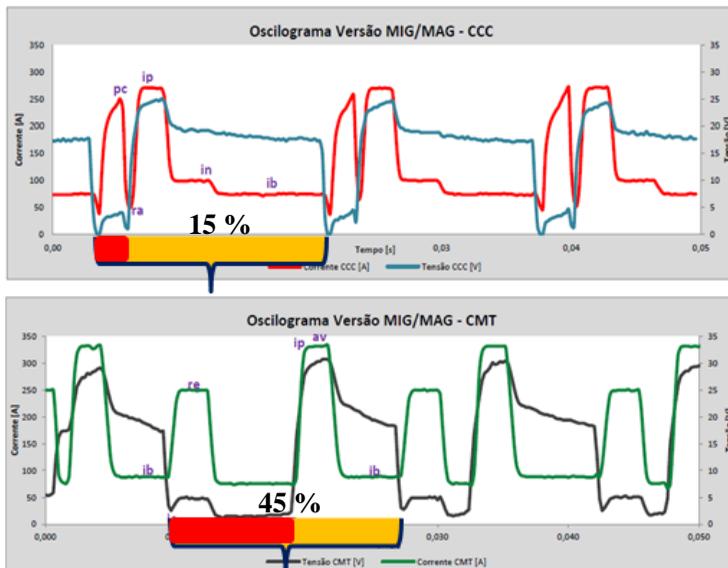


Figura 36 – Porcentagem da análise do tempo em curto em relação ao período total

Outra explicação está relacionada com o perfil da geometria do chanfro. O chanfro “V”, comparado com o chanfro “U”, possui uma quantidade maior de material (quantidade de massa), o que faz dissipar mais rapidamente o calor e dificultar a sua fusão, o que dificultaria mais a ação do CMT somado as hipóteses levantadas.

6.2 RAIZ EM CHANFRO “U”

6.2.1 Avaliação do procedimento – CCC – Tubo 18”

O objetivo inicial dos testes com a versão CCC foi o de encontrar variáveis de soldagem para o procedimento em chanfro U. Como foi verificada logo no início pelo autor, a tentativa de repetibilidade das mesmas variáveis de movimento utilizadas com chanfro V não obtiveram sucesso. No primeiro teste realizado com chanfro “U”, o cordão de solda apresentou falta de penetração em vários pontos da circunferência do tubo, o que levou à reprogramação das variáveis de soldagem, alterando-as de acordo com a necessidade e a percepção da operação.

Para as soldas realizadas com chanfro “U” utilizando a versão CCC, se mantiveram as variáveis da fonte iguais as dos ensaios com chanfro “V” e mostradas também na Tabela 4, porém, as alterações mais importantes na determinação de um procedimento robusto foram as variáveis de movimento, na qual tiveram sua sequência de alterações realizadas conforme ao que está exposto na Tabela 16.

Tabela 16 – Variáveis de procedimento em chanfro U

Corpo de Prova	Perfil de Movimentação	Gap [mm]	Nariz [mm]	Ângulo da Tocha [°]	Vs [cm/min]	At [mm]	f [Hz]	tp [ms]
UT – CP 01	Tpz	0,0	2,0 ^{+0,2}	5° Pux	25	1,0	0,8	0/0
UT – CP 02	Tpz	0,0	2,0 ^{+0,2}	5° Pux	20	6,0	0,8	0/0
UT – CP 03	Tpz	0,0	2,0 ^{+0,2}	5° Pux	19	6,0	1,0	200/200
UT – CP 04	Tpz	0,0	2,0 ^{+0,2}	5° Pux	40	1,5	2,0	0/0
UT – CP 05	Tpz	1,5	2,0 ^{+0,2}	5° Pux	35	1,0	1,0	0/0
UT – CP 06	Tpz	1,5	2,0 ^{+0,2}	5° Pux	34	2,0	1,0	0/0
UT – CP 07	Tpz	1,5	2,0 ^{+0,2}	10° Emp	34	2,0	2,0	200/200
U – CP 01	Tpz	1,5	2,0 ^{+0,2}	10° Emp	34	2,0	2,0	200/200
U – CP 02	Tpz	1,5	1,6 ^{+0,2}	10° Emp	34	2,0	2,0	200/200
U – CP 03	Tpz	0,0	1,6 ^{+0,2}	10° Emp	34	2,0	2,0	200/200
UT – CP 08	Linear	0,0	1,6 ^{+0,2}	10° Emp	35	NA	NA	NA
UT – CP 09	Trg	0,0	1,6 ^{+0,2}	10° Emp	34	2,0	1,5	200/200
U – CP 04	Trg	0,0 a 1,0	1,6 ^{+0,2}	10° Emp	30	4,0	1,0	100/100
U – CP 05	Trg	0,0	1,6 ^{+0,2}	10° Emp	30	4,0	1,0	100/100
U – CP 06	Trg	0,0	1,6 ^{+0,2}	10° Emp	28	4,0	1,0	100/100
U – CP 07	Trg	0,0	1,6 ^{+0,2}	10° Emp	28	4,0	1,4	100/100
U – CP 08	Trg	0,0	1,6 ^{+0,2}	10° Emp	28	4,0	1,4	100/100
U – CP 09	Trg	0,0	1,6 ^{+0,2}	10° Emp	28	4,0	1,4	100/100
U – CP 10	Trg	0,0	1,6 ^{+0,2}	10° Emp	28	4,0	1,4	100/100

Nota: Tpz – Trapezoidal; Trg – Triangular; Pux – Puxando; Emp – Empurrando; NA – Não Aplicado

As tentativas iniciais geraram defeitos como falta de fusão, ou falta de penetração, ou em alguns casos, convexidade excessiva na face. Nos testes UT-CP 01, UT-CP 02, UT-CP03 e UT-CP04, foram alteradas as variáveis como velocidade de soldagem (Vs), amplitude de tecimento (At) e tempo de parada (tp), sem alterar a configuração do chanfro. Entretanto, os defeitos continuaram a aparecer, ora sendo falta de penetração, ora convexidade excessiva na face da raiz. Recomenda-se que o cordão de raiz tenha uma forma geométrica favorável para receber o segundo passe. A face com convexidade excessiva, mesmo não sendo citada em normas como defeito, tende a gerar falta de fusão nas laterais do chanfro em passes de sobreposição.

Na sequência, como tentativa de propiciar uma melhor forma da poça para fundir o fundo do chanfro e assim, gerar penetração total, adicionou-se, nos testes UT-CP 05 e UT-CP 06, uma operação com esmerilhadeira manual. Foi feita uma abertura de raiz proposital, de aproximadamente 1,5 mm (espessura do disco de corte), depois da montagem da junta. No cordão do teste UT-CP 05, a raiz teve boa molhabilidade na face e com penetração total em toda a extensão soldada. A dificuldade nesse caso foi a perfuração da raiz na posição SC - 5h da junta. Como tentativa de corrigir esse defeito, a At foi aumentada de 1,0 mm para 2,0 mm no UT-CP06. O resultado foi um cordão com penetração total; porém, a convexidade excessiva na face entre a posição 5h e 6h persistia em aparecer.

Decidiu-se, nessa condição, alterar o ângulo de inclinação da tocha, a qual estava em 5° puxando. Quando a tocha foi colocada na posição perpendicular em relação ao tubo, perfurou a raiz logo na PP - 1h. Entretanto, no teste UT-CP 07, uma alteração em 10° empurrando foi posicionada na tocha, levando-a a um resultado admissível, apenas com leves convexidades na face da raiz na posição SC entre 5h e 6h.

Com o bom resultado apresentado, os ensaios na tentativa de validação começaram a ser executados. O primeiro ensaio, U-CP 01, foi realizado com as mesmas variáveis do UT-CP 07. No entanto, ao tentar repeti-lo, o cordão apresentou falta de fusão em vários pontos na posição SC - 5h, como apresentado na Figura 37 (a).

Para sanar essa dificuldade, tomou-se mais uma vez a decisão de alterar as dimensões do chanfro. Percebeu-se que os 2 mm que estavam sendo usados na espessura do nariz não

garantiam uma fusão completa da raiz. Esse valor não iria deixar o procedimento robusto, visto que em alguns casos conseguia-se fusão completa, e em outros casos não. A alteração feita para o U-CP 02 foi de diminuir a espessura do nariz do chanfro para 1,6 mm. A posição crítica foi novamente na SC - 5h, que apresentou perfuração da raiz, como mostrado na Figura 37 (b), reprovando assim o procedimento.

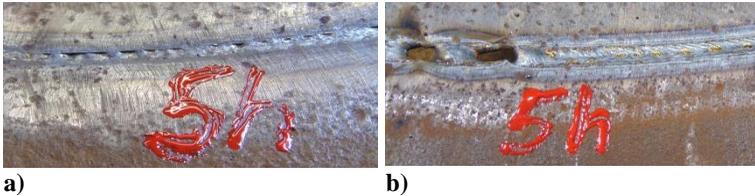


Figura 37 – a) Falta de fusão na raiz - U-CP 01, posição SC-5h; b) Perfuração na raiz – U-CP 02, posição SC-5h

Com uma menor espessura de nariz do chanfro e as perfurações obtidas, decidiu-se parar de realizar a operação de abertura de raiz com disco de corte e novamente ensaiar em chanfro sem abertura de raiz (*gap*). O U-CP 03 foi soldado, mas a falta de penetração foi perceptível em análise visual entre a posição SC – 5h e 6h.

Com os procedimentos insistindo em gerar defeitos, e sem intenção de alterar as variáveis elétricas da fonte, voltou-se a realizar testes com alteração do perfil de tecimento, que até o presente momento eram realizados apenas com perfil trapezoidal. O Tartilope V3 disponibiliza três formas diferenciadas: trapezoidal, linear e triangular.

O teste UT-CP 08 foi executado com o perfil linear. Por consequência, apareceram vários pontos de falta de penetração na posição PV – 3h e 4h.

A grande diferença entre o movimento com perfil trapezoidal e triangular é quando se inclui um tempo de parada nas extremidades do tecimento. O movimento triangular faz com que o Tartilope V3 tenha uma parada simultânea do eixo y (eixo de tecimento) e do eixo x (eixo de deslocamento longitudinal do equipamento em relação ao trilho). No perfil trapezoidal, a parada é apenas do eixo y sem a interrupção no eixo x.

Pensando nessa análise e verificando a parada nas extremidades de um chanfro que o soldador faz, quando realiza a

soldagem de raiz manualmente, foi aplicado no ensaio UT-CP 09 o perfil triangular de movimentação da tocha. Os resultados foram otimistas, com bom perfil geométrico na face e na raiz e sem defeitos ou descontinuidades. A única observação visual, incrementada no ensaio seguinte, foi a adequação da At. Percebeu-se a necessidade de aumentá-la, para que a poça de fusão subisse mais no chanfro e realizasse o ancoramento em suas paredes.

Na tentativa de validação do procedimento de soldagem de raiz no chanfro “U”, deu-se sequência nos ensaios. Na conferência das medidas do chanfro U-CP 04, constatou-se uma pequena abertura da raiz: entre 0 e 1 mm em alguns pontos da junta, em decorrência de imperfeições no processo de usinagem. Essas pequenas aberturas não comprometeram o resultado do ensaio, no qual se obteve penetração total em toda a sua extensão com boa aparência superficial, excelente molhabilidade e sem convexidade de face – mesmo na posição SC, que apresentava ser crítica.

Nas mesmas condições de chanfro, porém, sem variação de abertura de raiz, os ensaios U-CP 05 e U-CP 06, expostos na Figura 38, serviram como validação do procedimento de soldagem da raiz em chanfro “U” sem a utilização de *backing*. Em análise visual, os cordões obtiveram repetibilidade e condições aceitáveis perante as normas aplicáveis à construção de dutos.



Figura 38 – Soldas com versão CCC em tubos de 18” – U-CP 04; U-CP 05; U-CP 06

Um procedimento robusto deve ter concatenadas as variáveis de movimentação com as variáveis elétricas. A confiabilidade dos equipamentos torna-se primordial. Nesse quesito, o sistema de movimentação do Tartilope V3 atendeu bem às variáveis impostas em sua IHM (Interface Homem Máquina). Dados referentes à verificação do movimento do Tartilope V3 serão expostos no decorrer do trabalho.

A versão CCC utilizada nos testes obteve comportamento regular na maioria das situações. Foi constatado, no ensaio U-CP 07, a importância da regularidade na transferência da gota na poça, com a finalidade de não gerar qualquer tipo de defeito que possa comprometer a junta. Em um momento esporádico na realização da soldagem desse ensaio, um instante de instabilidade na transferência metálica foi perceptível pelo operador que, ao término da solda em inspeção visual, detectou falta de penetração em pequeno ponto na posição SC – 4,5h, mostrada na Figura 39. Essa instabilidade é mostrada nos gráficos de tensão e corrente da Figura 40, em que o SAP realizou a aquisição de dados sincronizada com a solda. Essa é também uma forma de pré-avaliar e rastrear a raiz. Extraíndo a parte da instabilidade na solda, o restante do cordão atendeu aos requisitos de aceitação.



Figura 39 - U-CP 07 - Região de Instabilidade

Tratando-se de soldagem orbital, um dos principais problemas para a mecanização é o desalinhamento axial entre os tubos, conhecido em campo como *High-Low*. As normas quantificam um valor máximo permitido para a montagem da junta, mostrado na Tabela 1. Contudo, o procedimento de soldagem deve ser robusto o suficiente para compensar esses desalinhamentos.

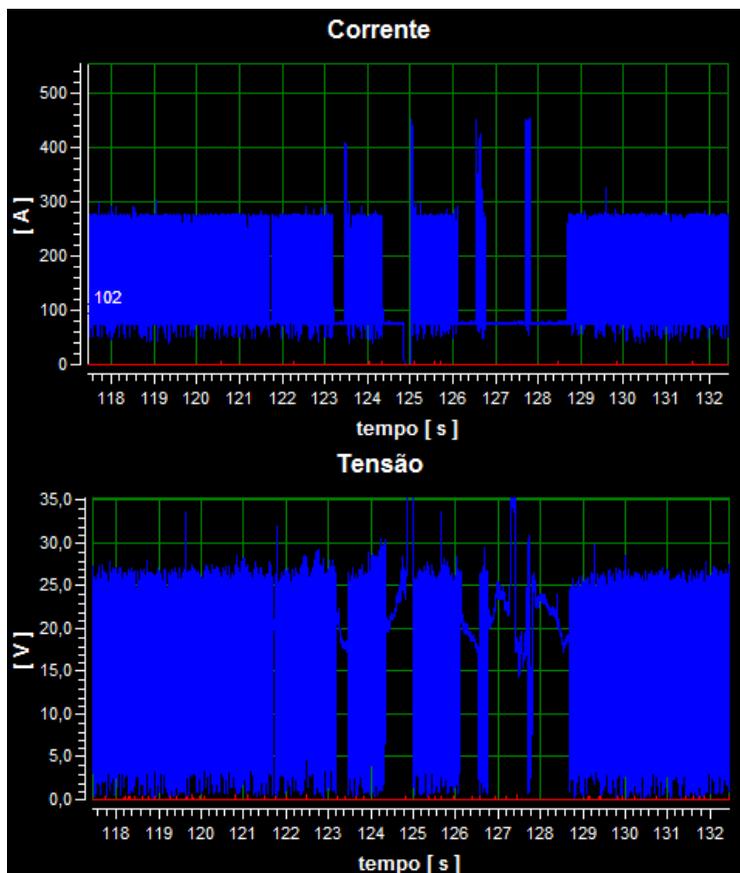


Figura 40 - Gráficos U-CP07 - Região de instabilidade

Os ensaios U-CP 08, U-CP 09 e U-CP 10 foram soldados com desalinhamento proposital entre os tubos com as mesmas variáveis utilizadas nos ensaios anteriores. Esses desalinhamentos variaram dependendo da posição no tubo, os quais chegaram a valores próximos a 2 mm. Em análise visual, as soldas compensaram as imperfeições do chanfro com resultados positivos. As soldas ficaram com bom aspecto superficial e com penetração total em todas as posições – tornando o mesmo procedimento, realizado nos CP's anteriores, robusto e repetível. A Figura 41 mostra a aparência superficial da face e da raiz dos ensaios acima citados.

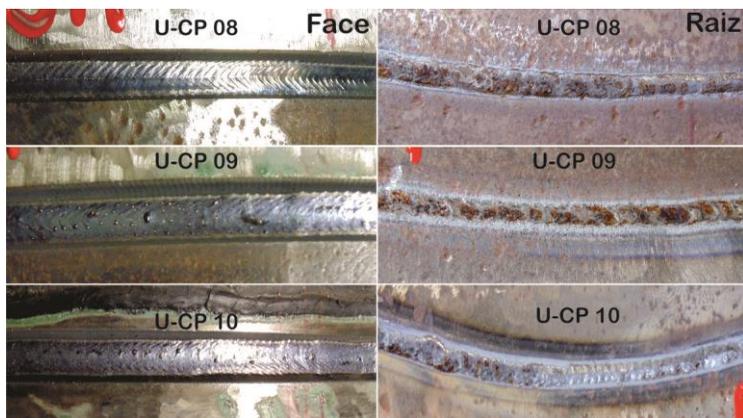


Figura 41 - Soldas com versão CCC – U-CP 08; U-CP 09; U-CP 10

O presente procedimento levanta uma discussão também acerca do ângulo de ataque da tocha. Scotti e Ponomarev [60] relatam em seu texto que é comum, na soldagem na posição plana, os soldadores preferirem deslocar a tocha no sentido empurrando, com a finalidade de melhorar o controle da penetração e evitar a perfuração. Mas outros soldadores preferem soldar com ângulo da tocha puxando, fazendo que o arco incida mais na poça do que no fundo do chanfro. Os autores citam também que, para a posição vertical ascendente, deve-se soldar com ângulo empurrando. Para posição vertical descendente, é também possível deslocar o sentido da tocha empurrando, mesmo não sendo comumente realizado – justificando a maior dificuldade de se soldar passes de raiz com sistemas automatizados [60]. No entanto, nesse trabalho, todos os ensaios com bons resultados foram realizados com a tocha empurrando em todo o percurso do tubo, independentemente de sua posição e com sistema mecanizado.

Diante da quantidade de testes para tentativa e ensaios para validação, o procedimento desenvolvido atende perfeitamente às condições especificadas em normas para dutos.

6.2.2 Análise das soldas CCC – Tubo de 18”

Após a análise visual das condições gerais das soldas, macrografias foram feitas com intuito de caracterizar o perfil geométrico de fusão das juntas e avaliar internamente os aspectos

da solda em cada posição: PP, PV e SC. Amostras são ilustradas na Figura 42.

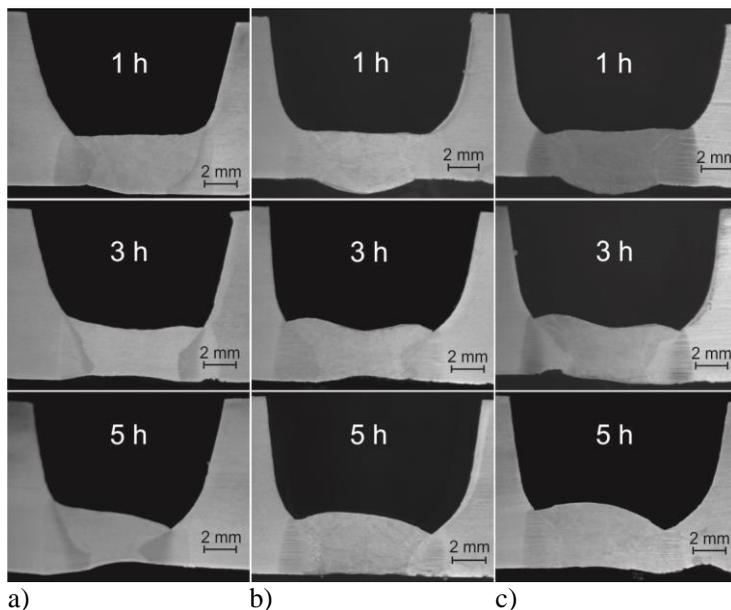


Figura 42 - Macrografias CCC: a) U-CP 05; b) U-CP 06; c) U-CP 07

Na visualização é possível observar a fusão total em ambos os lados do chanfro, a qual compensou leves desalinhamentos na montagem das juntas. Na posição PP – 1h, o perfil fundido gerou reforço na raiz, comum para tal posição, pela atuação das forças gravitacionais envolvidas. Essas forças agem no sentido de aumentar a pressão exercida na poça, o que contribui para a formação de um maior reforço. À medida que há continuidade da progressão da soldagem ao longo da circunferência do tubo, as forças gravitacionais diminuem a intensidade contra a poça e acabam agindo também em outras componentes. Nas posições PV e SC, observou-se nas macrografias que o efeito do reforço da raiz não acontece – o que deixa a solda na maioria das situações nivelada com a parede do tubo. Já em alguns casos esporádicos, como, por exemplo, o da macrografia PV-3h (b), apareceu uma leve concavidade interna. Nas macrografias apresentadas, notou-se a similaridade do perfil geométrico entre o CP-06 e CP-07, nas quais apresentaram leve convexidade na posição SC – 5h

e também mostrou a tendência de acumular metal fundido nas laterais na posição PV – 3h, o que não foi observado nas macrografias do CP-05. A única diferença entre as condições dos procedimentos executados foi em relação à medida do chanfro. De fato, constatou-se nas medições que o CP-05 apresentou valores menores de abertura de chanfro devido à usinagem; sem afetar, entretanto, a operacionalidade do procedimento. A grande vantagem dessas divergências do chanfro é permitir que o procedimento seja realizado com uma margem de operação maior – o que traduz em maior robustez, sem que pequenos erros na fabricação da junta interfiram na qualidade final da solda.

Todas as amostras analisadas passaram por medições dimensionais do perfil geométrico do metal fundido. Para realização das medidas foram adotados os mesmos critérios usados nas medições do chanfro “V”, expostas na Figura 21 e seus valores estão detalhados na Tabela 17.

Tabela 17 - Valores das medições na raiz com CCC - Chanfro U – Tubo 18” – espessura 7/16”

Corpo de Prova U	Posição [h]	Espessura Cordão [mm]	Espessura Efetiva [mm]	Largura Face [mm]	Convexidade Face [mm]	Altura do Reforço da Raiz [mm]	Largura do Reforço da Raiz [mm]	Concavidade Interna [mm]	Desalinhamento [mm]	Área de Metal Fundido [mm ²]
CP 05	1	3,8	3,3	7,4	0,0	0,0	4,6	0,0	0,6	21,6
	3	3,1	3,1	8,2	0,0	0,0	5,5	0,2	0,0	20,3
	5	3,2	2,0	7,2	0,3	0,0	3,6	0,3	1,1	19,6
CP 06	1	4,2	3,2	8,8	0,0	1,0	7,1	0,0	0,0	25,9
	3	2,8	2,8	10,1	0,4	0,0	6,1	0,4	0,0	24,1
	5	3,7	2,9	9,3	0,8	0,0	6,2	0,1	0,0	25,6
CP 07	1	4,2	3,0	9,3	0,2	0,9	6,7	0,0	0,5	29,9
	3	3,4	2,9	10,0	0,5	0,0	5,7	0,0	0,8	26,3
	5	4,0	2,4	8,9	1,1	0,0	4,7	0,2	0,0	24,3

As amostras da Figura 43 mostram o perfil geométrico do metal fundido em ensaios com tubos propositalmente desalinhados. O desalinhamento foi provocado em diferentes

posições com o objetivo de verificar, mesmo nas posições mais críticas, o comportamento do procedimento em relação à compensação da solda. Esse tipo de montagem com *High-Low* é comum ser encontrada em montagens de dutos no campo, devido às imperfeições geométricas dos tubos.

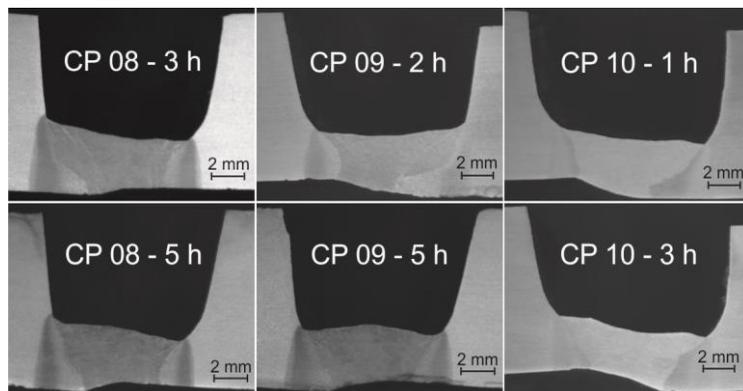


Figura 43 - Macrografias CCC com desalinhamento proposital nos tubos

Pôde-se constatar que o procedimento foi robusto e compensou o desalinhamento em vários pontos da junta. Os valores dos desalinhamentos foram aumentados gradativamente a cada ensaio. No caso do U-CP 08, o desalinhamento máximo foi de 1,0 mm, o U-CP 09 com 1,5 mm e o U-CP 10 chegando a quase 2,0 mm. Foi importante observar que, no U-CP 10, a compensação de quase 2,0 mm foi em uma posição considerada crítica: posição PV – 3h. Essa posição é considerada de maior dificuldade pela maior fluidez da poça e pela gravidade agindo desfavoravelmente.

Para o perfil geométrico de fusão, todas as amostras atenderam aos requisitos de aceitação, fundindo em ambos os lados do chanfro. Cordões sem convexidade foram evidenciados, ideais para receberem a sobreposição de passes. A Tabela 18 apresenta os valores das medições utilizando os mesmos critérios apresentados na Figura 21.

Para a complementação da análise, o gráfico da Figura 44 apresenta os valores médios instantâneos aquisitados com a ferramenta SAP. O conjunto de ensaios apresentou similaridade nos valores. Uma informação interessante originada nesses dados

são os valores de I_m , cujas semelhanças, de fato, remetem aos ensaios em igualdade de condições de execução, principalmente quando se trata de manter as mesmas alturas de DBCP.

Tabela 18 – Valores das medições na raiz com CCC - Tubos com desalinhamento - Chanfro U – Tubo 18” – espessura 7/16”

Corpo de Prova U	Posição [h]	Espessura Cordão [mm]	Espessura Efetiva [mm]	Largura Face [mm]	Convexidade Face [mm]	Altura do Reforço da Raiz [mm]	Largura do Reforço da Raiz [mm]	Concavidade Interna [mm]	Desalinhamento [mm]	Área de Metal Fundido [mm ²]
CP 08	3	3,2	2,9	8,1	0,0	0,0	4,3	0,2	0,9	21,4
	5	3,4	2,5	8,2	0,0	0,0	4,8	0,4	1,0	21,3
CP 09	2	3,5	2,7	8,0	0,0	0,2	3,3	0,0	1,4	21,1
	5	3,6	2,9	8,2	0,4	0,0	4,3	0,2	1,1	21,3
CP 10	1	3,7	2,0	8,8	0,0	0,3	4,7	0,0	1,4	22,6
	3	3,3	2,2	9,3	0,0	0,0	4,8	0,2	1,9	22,8

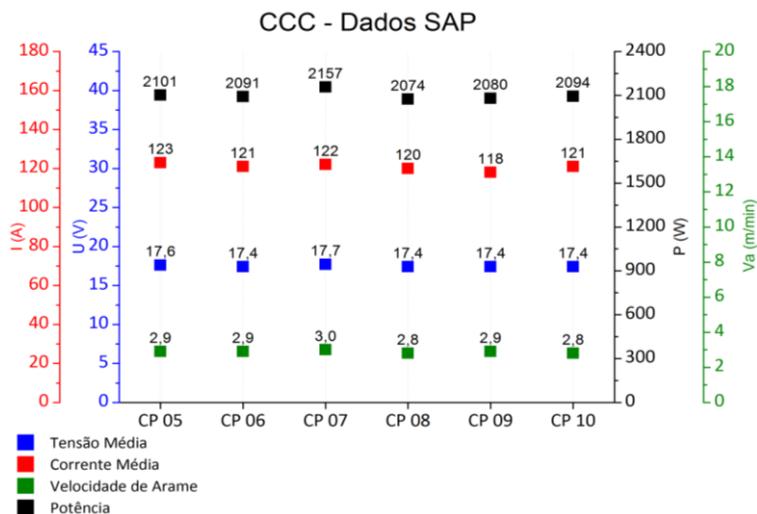


Figura 44 - Gráficos dos dados aqisitados com SAP – CCC – Chanfro “U” – Tubo de 18”

Em síntese, o autor credita um procedimento com boa repetibilidade, qualidade e robustez das soldas, pelo fato de que, mesmo com pequenas variações no chanfro ou nas variáveis de movimento, o procedimento atendeu às condições exigidas em normas aplicadas à construção de dutos. A especificação de procedimento de soldagem (EPS) para o tubo ensaiado está disponível do apêndice A deste trabalho, com as variáveis utilizadas e detalhes operacionais de equipamento e consumíveis.

6.2.3 Avaliação do procedimento – CMT – Tubo 18”

A versão CMT é indicada principalmente para a soldagem em chapas finas. Contudo, existem artigos que citam sua aplicação para a soldagem de raiz em tubos [37] [61]. Os autores referenciam à tecnologia para a soldagem de raiz em chanfro “U” sem a utilização de *backing*. Em se tratando de chanfro V, foi perceptível a tendência de falta de fusão nas suas laterais, como observada na seção 6.1.2. O motivo pode ser devido à característica do chanfro e ao tempo de permanência em curto maior da versão CMT, quando comparado às outras versões MIG/MAG com controle de corrente. O chanfro em “V”, por ter maior quantidade de material comparado ao chanfro “U”, dissipa mais rapidamente o calor, dificultando a sua fusão.

Já no chanfro “U”, uma das características geométricas é a formação na junta, na parte inferior, similar a uma chapa fina. Até que não atinja a parte do raio do bisel, é como se no processo tivessem que ser soldadas duas chapas em uma união sem chanfro. No caso deste trabalho, essa espessura é equivalente ao nariz de 1,6 +/- 0,2 mm. Para essa situação, a dissipação de calor é menor, facilitando a união com a versão CMT.

No primeiro ensaio, CMT-U-CP 01, foram utilizados as mesmas variáveis de movimento usadas na versão CCC, com o programa sinérgico CMT: “G3Si 1,2 mm, Ar CO₂”, Va 5,9 m/min, CA -10. O resultado foi uma raiz com falta de fusão na posição SC. No ensaio seguinte, CMT-U-CP 02, alterou-se o valor de CA para 20, o que provocou um aumento nos valores de tensão média, corrente média, Va média, e conseqüentemente, nos da potência média. Na sobreposição de oscilogramas, expostas nos gráficos da Figura 45, foi possível entender o aumento das variáveis citadas ao observar que a diferença na variável CA alterada da fonte, ocasionou na versão CMT uma

maior frequência de destacamento, variando de 62 Hz com CA -10, para 70 Hz com CA 20.

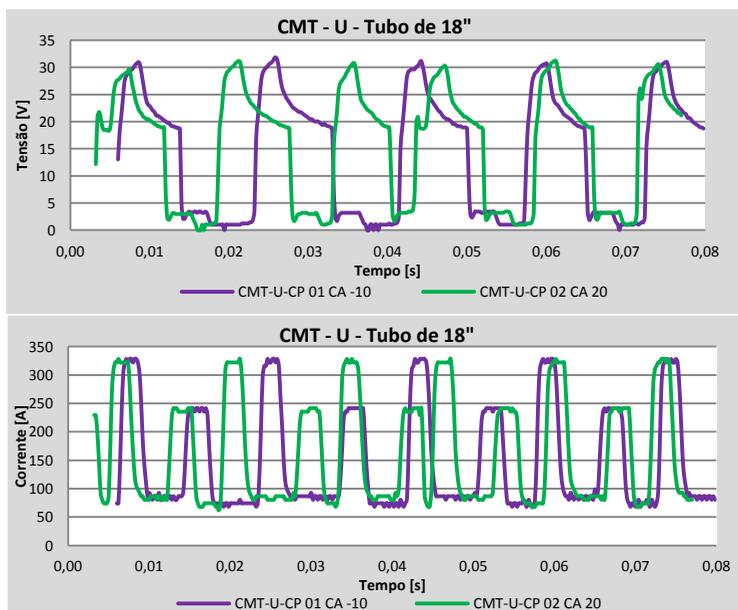


Figura 45 – Gráficos sobrepostos de tensão e corrente CMT-Chanfro U para cada regulagem de CA

Com a frequência maior, diminuiu-se o tempo de permanência em curto – sendo a solução para todos os ensaios realizados com a versão CMT no chanfro U. Os valores adotados para a versão CMT estão expressos na Tabela 19. Na Figura 46, tem-se a visão geral dos cordões de solda dos ensaios – CMT-U CP 03, CMT-U-CP 04, CMT-U-CP 05 – os quais serviram de validação do procedimento. Um detalhe importante que deve ser considerado foi a não alteração das variáveis de movimento e a não alteração das dimensões do chanfro em relação ao procedimento validado com CCC. As soldas apresentaram bom aspecto superficial, penetração total e boa molhabilidade do cordão, sem a ocorrência de falta de fusão.

Tabela 19 - Variáveis de soldagem chanfro U - Tubo 18"

Corpo de Prova	Perfil de Movimentação	Gap [mm]	Nariz [mm]	Ângulo da Tocha [°]	Vs [cm/min]	At [mm]	f [Hz]	tp [ms]
CMT-U – CP 03	Trg	0,0	1,6 ^{+/-0,2}	10° Emp	28	4,0	1,4	100/100
CMT-U – CP 04	Trg	0,0	1,6 ^{+/-0,2}	10° Emp	28	4,0	1,4	100/100
CMT-U – CP 05	Trg	0,0	1,6 ^{+/-0,2}	10° Emp	28	4,0	1,4	100/100

Nota: Trg – Triangular; Emp – Empurrando

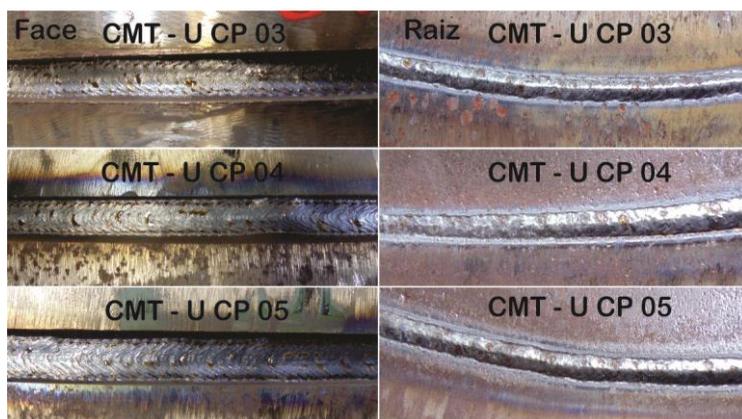
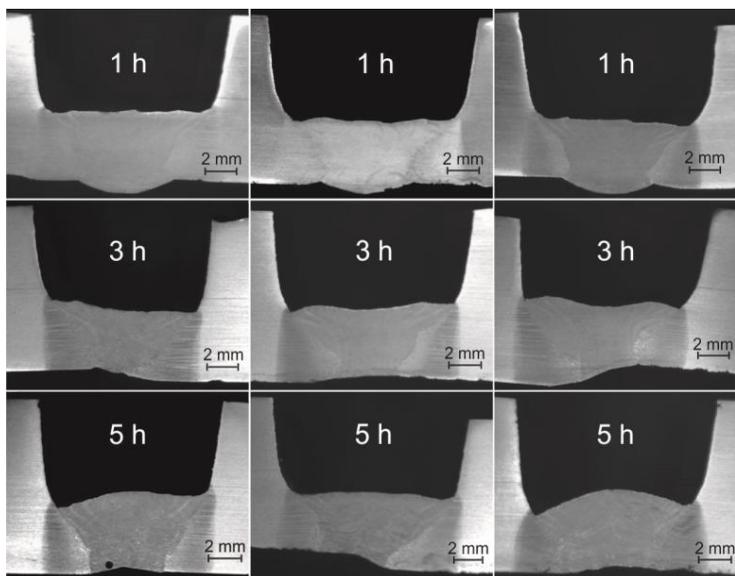


Figura 46 - Soldas em tubos com a versão CMT

6.2.4 Avaliação das soldas – CMT – Tubo 18"

Uma avaliação mais detalhada do cordão foi realizada por meio de análise das macrografias, mostradas na Figura 47. Nesse sentido conseguiu-se observar os aspectos de fusão no chanfro em posições diferentes do tubo: PP, PV e SC, verificando se as amostras apresentavam algum tipo de descontinuidade.



a) b) c)
Figura 47 - Macrografias CMT - Tubo 18" - a) CMT-U-CP 03; b) CMT-U-CP 04; c) CMT-U-CP 05

Os cordões apresentaram comportamento similar aos ensaios com CCC, o qual retratou reforço na raiz para PP, incidência de concavidade interna na PV e SC, leve convexidade na posição SC e compensou desalinhamentos da junta devido à ovalização do tubo. A ocorrência de poro na parte inferior da raiz, na posição SC – 5 h do CMT-U-CP 03, levantou a hipótese se ser algo esporádico, por não ter sido apresentado em nenhum outro ensaio.

O resultado mais relevante em comparação com CCC é o aumento da espessura do cordão, a espessura efetiva e a área de metal fundido. Essa diferença é explicada pelo maior valor de V_a resultante da versão CMT, ainda que com a mesma velocidade de soldagem. Os valores das medições são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Valores de raiz com CMT - Chanfro U - Tubo 18” – espessura 7/16”

Corpo de Prova U	Posição [h]	Espessura Cordão [mm]	Espessura Efetiva [mm]	Largura Face [mm]	Convexidade Face [mm]	Altura do Reforço da Raiz [mm]	Largura do Reforço da Raiz [mm]	Concavidade Interna [mm]	High-Low [mm]	Área de Metal Fundido [mm ²]
CP 03	1	5,5	4,4	9,8	0,0	0,9	5,8	0,0	0,0	34,7
	3	4,2	3,3	9,5	0,0	0,0	1,4	0,0	1,1	21,3
	5	4,8	3,7	9,5	0,7	0,0	4,6	0,4	0,0	31,4
CP 04	1	4,8	3,7	10,6	0,0	0,9	4,5	0,0	0,0	30,7
	3	4,3	4,1	10,4	0,4	0,0	4,0	0,0	0,8	29,4
	5	4,6	4,1	10,0	0,4	0,0	4,3	0,5	1,6	33,4
CP 05	1	5,0	3,3	9,7	0,0	0,9	5,9	0,0	0,8	30,6
	3	4,3	3,4	10,5	0,5	0,0	3,9	0,2	1,8	30,5
	5	4,9	3,1	10,6	1,4	0,0	5,6	0,3	0,6	35,4

Na observação dos dados aquisitados com a ferramenta SAP, gráfico da Figura 48, verificou-se a Im constante nos ensaios e uma pequena diferença no valor de Va – o que é normal para o programa da fonte CMT devido à variação da DBCP ocorrida durante a soldagem dos tubos. Como já explicado na seção 6.1.1, a Va regulada na fonte não implica o valor real depositado. Nessa aplicação, os valores médios verificados foram de 4,0 a 4,3 m/min.

Os ensaios com a versão CMT comprovam a afirmativa de alguns autores, que usam o chanfro U para a soldagem de raiz mecanizada sem a utilização de *backing*. O procedimento validado pelo autor desse trabalho mostrou ser robusto e com boa repetibilidade e qualidade. A EPS para essa versão está no Apêndice C deste trabalho.

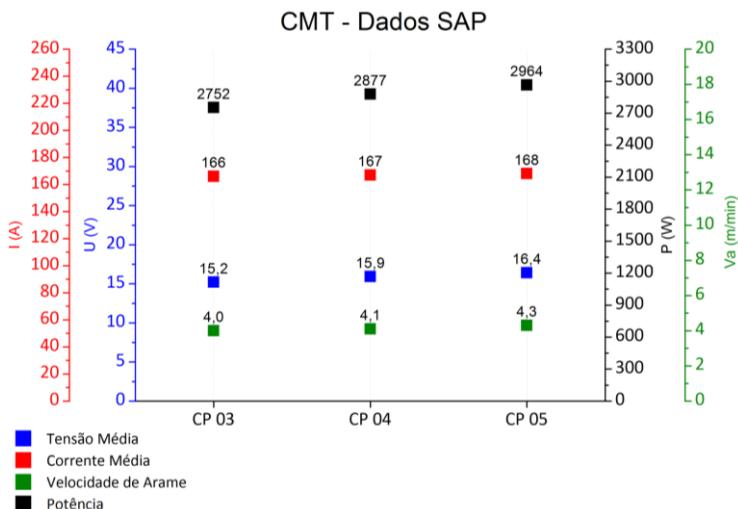


Figura 48 - Gráfico de dados aquisitados com o SAP - Versão CMT - Tubo 18\"

6.3 VALIDAÇÃO DE PROCEDIMENTO EM TUBOS DE DIFERENTES DIÂMETROS E ESPESSURAS

Com a exploração de petróleo e gás em distintos e inóspitos locais, constituem as empresas da área de soldagem a ter uma estrutura de procedimentos de soldagem que atenda essa diversidade de diâmetros e espessuras de tubos.

É comum as empresas apresentarem EPS's com ampla faixa de valores para as variáveis de soldagem. Isso pode induzir o operador a escolher um conjunto de variáveis de soldagem não funcionais, que ao final pode gerar soldas com descontinuidades e defeitos e que tenham de ser retrabalhadas. Nesse contexto, os ensaios para validação do procedimento de raiz com a versão CCC foram aplicados em tubos de diâmetros e espessuras diferentes.

6.3.1 Tubos de 22\"

O primeiro tubo soldado, com o objetivo de conferir a robustez do procedimento em chanfro U, foi o tubo API 5L X70 MS, de 22\" de diâmetro e espessura com 1 ¼\". A grande diferença operacional nesse tubo em relação ao de 18\" foi

o posicionamento do bico de contato da tocha, o qual foi ajustado aproximadamente 20 mm para fora do bocal, como exposto na Figura 49. Fez-se necessária essa configuração, com o propósito de se igualar a distância da DBCP usada nos ensaios anteriores – o que contribuiu para o bom funcionamento da versão CCC dentro do chanfro. A vazão de gás foi obrigatoriamente aumentada para garantir a proteção dentro do chanfro. Nesse caso, usou-se 25 L/min, já que vazões menores a essa condição apresentaram cordões com poros.

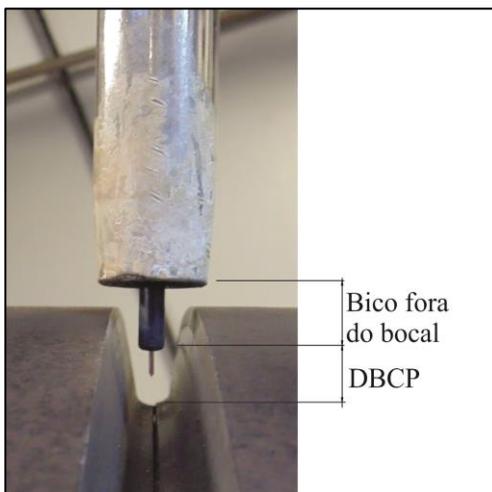


Figura 49 – Detalhe do bico de contato dentro do chanfro U

Para os corpos de prova U-CP 12 e U-CP 13, as mesmas variáveis utilizadas nos ensaios com tubos de 18” foram executadas com resultados expressivos. Os cordões apresentaram raízes sem defeitos, com bom aspecto superficial e molhabilidade dentro do chanfro. Nesse caso, vale ressaltar que o tubo apresenta maior massa devido à sua espessura em comparação ao tubo soldado anteriormente.

Em se tratando dos corpos de prova U-CP 14 e U-CP 15, com o objetivo de aumentar a taxa de deposição de arame com o uso do CCC, alterou-se o valor de 3,3 m/min para 4,4 m/min. Esse valor foi acrescido ao sinérgico do CCC e também foi realizado o ajuste fino com regulação no campo “configuração”,

alterando o valor de C_{ta} para 0,4. A forma e o objetivo de alterar essa variável foi mencionada na seção 3.3.1.

Na execução da solda com aumento de V_a , o operador percebeu no instante da soldagem certo acúmulo de material na poça, obrigando-o nessa situação a aumentar também a V_s em torno de 31 cm/min. Por fim, a solda apresentou bom resultado, tanto na raiz, quanto na face, como pode ser visualizado na Figura 50.



Figura 50 - Soldas em tubos de 22” com a versão CCC

Nas seções macrográficas da Figura 51, é possível observar a geometria de fusão dos cordões, executados com as duas V_a citadas anteriormente e em diferentes posições do tubo.

A poça de fusão solidificada apresentou-se como comumente já observado em outras análises. Comportamentos específicos de cada posição de soldagem no tubo foram verificados: algumas gerando reforço mais pronunciado, enquanto outras, com o perfil fundido alinhado com o metal de base ou apresentando leve concavidade. Um detalhe importante, observado nessas amostras, é a diferença do ancoramento do metal fundido nas paredes do chanfro. É perceptível que, no U-CP 14, o metal fundido encontra-se na região acima da curva do raio do bisel. A explicação decorre de uma maior quantidade de

metal depositado devido à variação de V_a , mas principalmente pela diferença de abertura de chanfro – abertura esta onde foi constatada a diferença de aproximadamente 2 mm em todo o chanfro, ocasionada pelo processo de usinagem.

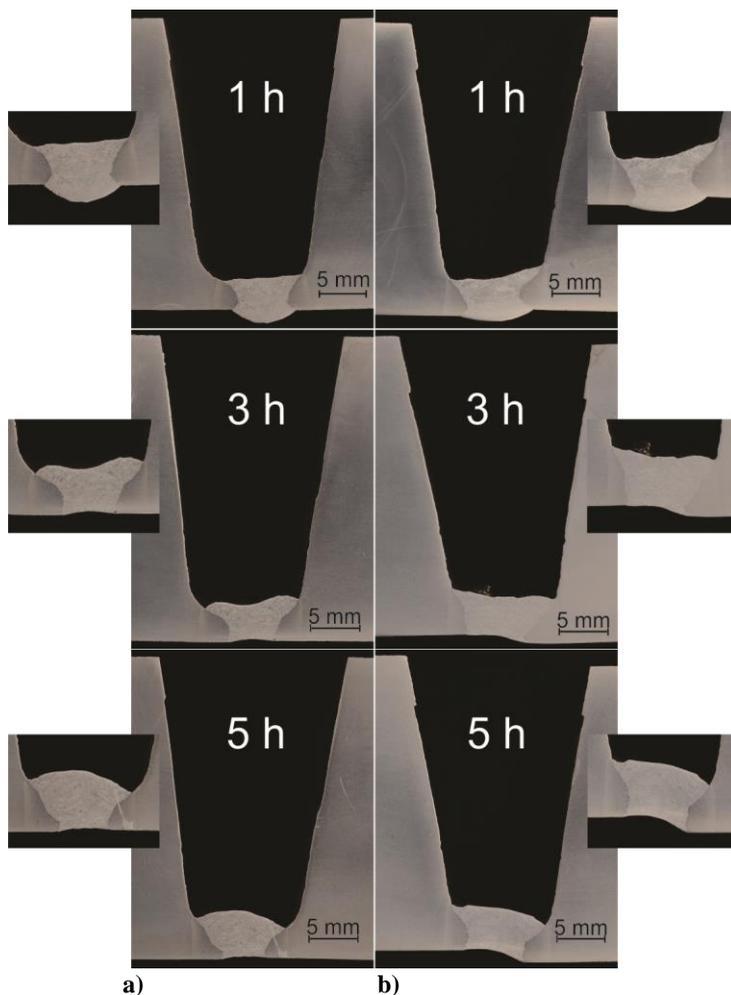


Figura 51 - Macrografias CCC - Tubo 22" - a) U-CP 12; b) U-CP 14

Em todas as posições, o perfil de fusão do metal de adição no metal de base das amostras do U-CP 14 é mais largo e robusto, comparado ao do U-CP12. No entanto, não há muita diferença em

suas espessuras, como detalhado nos valores da Tabela 21. Valores da área de metal fundido acabam também se aproximando, mesmo com diferentes Va. Isso é explicado pela compensação da Vs no U-CP 14. A hipótese de um cordão mais largo e robusto pode ter ocorrido devido às diferenças de abertura de chanfro proporcionar uma melhor deposição metálica, mas também devido ao fato de o ensaio ser realizado com maior potência. Os valores das aquisições de dados elétricos e Va são apresentados no gráfico da Figura 52.

Tabela 21 - Valores de raiz com CCC - Chanfro U - Tubo 22" – espessura 1 ¼"

Corpo de Prova U	Posição [h]	Espessura Cordão [mm]	Espessura Efetiva [mm]	Largura Face [mm]	Convexidade Face [mm]	Altura do Reforço da Raiz [mm]	Largura do Reforço da Raiz [mm]	Concavidade Interna[mm]	Desalinhamento [mm]	Área de Metal Fundido[mm ²]
CP 12	1	4,9	3,2	9,1	0,0	1,5	7,2	0,0	0,0	29,4
	3	3,5	3,1	10,3	0,6	0,0	5,0	0,3	0,0	27,9
	5	4,9	3,0	9,8	1,3	0,0	4,7	0,2	0,0	31,6
CP 14	1	4,7	3,3	9,8	0,0	0,9	7,6	0,0	0,7	32,0
	3	4,1	3,7	9,8	0,0	0,0	5,6	0,3	1,1	32,4
	5	4,5	2,6	9,6	0,8	0,0	6,3	0,6	1,4	32,7

No ensaio U-CP 14, o desalinhamento da junta em quase toda a circunferência do tubo foi compensado pela solda sem promover qualquer defeito.

Os ensaios mostraram um procedimento que atende às condições das normas para dutos e, principalmente, compensando as pequenas variações da usinagem e desalinhamento dos chanfros. Contudo, mínimas alterações em algumas variáveis foram, de fato, obrigatoriamente alteradas para as compensações decorrentes. Porém, nenhum desses valores é muito amplo, comparado ao que se vê em campo atualmente nas EPS's para soldagem manual.

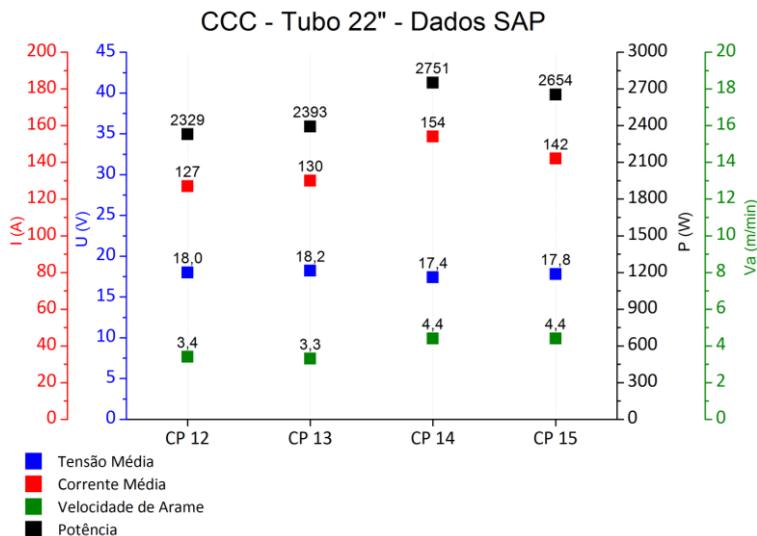


Figura 52 - Gráficos CCC - Tubo 22" – Chanfro “U”

O procedimento de raiz em chanfro estreito de grande espessura, $1\frac{1}{4}$ " (31,75 mm), é o primeiro passo para um procedimento de maior produtividade comparado ao uso de chanfros mais abertos, como é o caso do chanfro V. Em uma simples comparação de área, para o tubo em estudo, um chanfro V com abertura total de 60° e abertura de raiz com 3,0 mm apresentaria em torno de 680 mm^2 . Para o chanfro em V modificado, utilizado no desafio Petrobras e mostrado na Figura 11(a), a área medida é de 564 mm^2 para a abertura de raiz com 3,0 mm. Já para o chanfro U, utilizado nos ensaios apresentados nesta seção, o valor é de aproximadamente 480 mm^2 , sem abertura de raiz. A diferença de valores é impactante, caso fosse realizada uma comparação do tempo de arco aberto, material de consumo e custo de mão de obra, além de fatores indiretos ligados ao prazo da obra.

Uma EPS com os detalhes das variáveis de soldagem utilizadas para esse tubo está disponibilizada no Apêndice B.

6.3.2 Tubos de 16”

Os tubos de 16” (406,4 mm) e espessura de ½” (12,7 mm) foram soldados com a versão CCC e as variáveis da fonte para cada ensaio estão expostas na Tabela 22.

Tabela 22 – Variáveis da fonte para a versão CCC – Tubo 16”

Corpo de Prova	Va [m/min]	Variável “a”	Cta	Ckr
U-CP 11	3,0	30	1,0	0,0
U-CP 16	3,4	30	1,0	0,0
U-CP 17	4,4	30	0,4	0,0

Quanto as variáveis de movimento do manipulador robótico, foram adotados os mesmos valores dos ensaios realizados em tubos de 18”. Todos os cordões ficaram com bom aspecto superficial e raiz com penetração total em toda a extensão do tubo, como observado nas imagens da Figura 53.

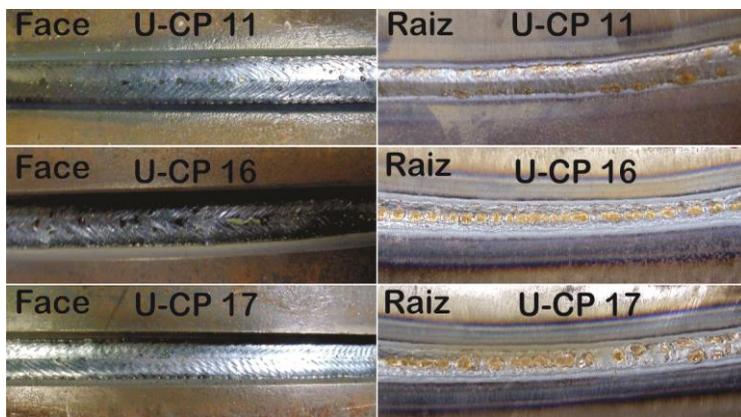


Figura 53 - Soldas em tubos de 16” com a versão CCC

Para a análise da geometria do metal fundido, amostras macrográficas da Figura 54 foram preparadas apenas com o U-CP 16 e com o U-CP 17. Na observação das macrografias, percebe-se um cordão mais largo e robusto, principalmente nas posições PP e PV do tubo soldado com Va maior, fornecendo, conseqüentemente, maior energia ao processo. No entanto, o

cordão da SC do U-CP 17 apresentou convexidade um pouco excessiva, o que pode ser passível de operação de esmerilhamento para receber o passe subsequente.

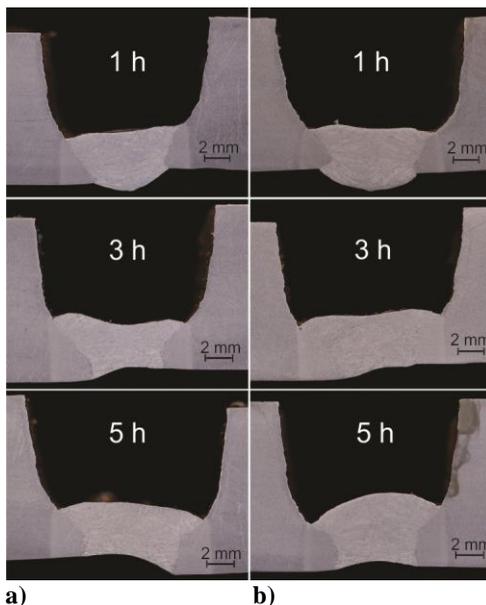


Figura 54 - Macrografias CCC - a) U-CP 16; b) U-CP 17

No que tange às medições do perfil geométrico de fusão, detalhadas na Tabela 23, com base na Figura 21, os valores apresentaram um percentual entre 15% a 20% em média a mais para os resultados do tubo soldado com Va de 4,4 m/min, em comparação ao tubo soldado com 3,4 m/min.

Os dados referentes à aquisição com a ferramenta SAP, na qual se detalha a diferença de energia para cada soldagem, estão sendo mostrados no gráfico da Figura 55.

O procedimento mais uma vez mostrou atender bem às condições impostas em normas, com cordões sem presença de discontinuidades e defeitos. A montagem das juntas para os ensaios com tubos de 16" apresentaram desalinhamentos permissíveis, mas também foram absorvidos e compensados pela robustez do procedimento. O Apêndice A traz a EPS para os ensaios realizados nesses tubos.

Tabela 23 - Valores de raiz com CCC - Chanfro U - Tubo 16" - espessura 1/2"

Corpo de Prova U	Posição [h]	Espessura Cordão [mm]	Espessura Efetiva [mm]	Largura Face [mm]	Convexidade Face [mm]	Altura do Reforço da Raiz [mm]	Largura do Reforço da Raiz [mm]	Concavidade Interna[mm]	Desalinhamento [mm]	Área de Metal Fundido[mm ²]
CP 16	1	4,8	2,4	9,5	0,0	1,3	6,1	0,0	1,5	32,0
	3	3,3	3,1	10,6	0,8	0,0	5,6	0,5	1,3	29,2
	5	4,0	2,7	10,6	0,9	0,0	6,6	0,7	1,7	33,0
CP 17	1	5,2	3,0	9,5	0,4	1,6	7,4	0,0	0,8	35,4
	3	4,4	3,4	10,6	0,6	0,0	5,4	0,3	1,2	35,7
	5	5,1	2,9	10,1	1,6	0,0	6,4	0,5	0,6	36,4

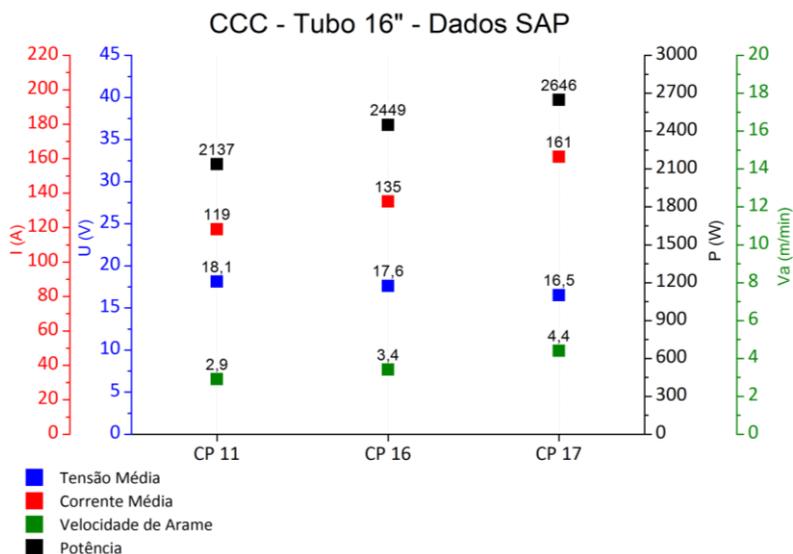


Figura 55 - Gráfico dados CCC - tubo 16" – Chanfro "U"

6.4 RESULTADOS COMPARATIVOS ENTRE CMT E CCC PARA CHANFRO “U”

Com o objetivo de comparar os perfis geométricos de fusão no chanfro realizadas com as versões CCC e CMT, tubos de 18” (457,2 mm) e espessura de 7/16” (11,1 mm) foram soldados.

A Figura 56 apresenta o aspecto superficial e a raiz dos tubos soldados com a versão CCC. Para ser plausível de comparação, regulou-se a versão CCC com V_a de 4,4 m/min – valor aproximado que foi verificado nos ensaios com a versão CMT, ensaios estes apresentados na seção 6.2.4. A versão CCC correspondeu com boa dinâmica na transferência metálica, mesmo com uma regulagem maior de V_a . Em nenhum momento, houve instabilidades que comprometessem o resultado da solda. Quanto às variáveis de movimento, inicialmente na posição entre 12h a 1h, o operador alterou a V_s de 28 cm/min para 30 cm/min, a fim de evitar perfuração na posição plana. Com o aumento de V_a no CCC, a corrente média aumenta – o que pode gerar perfurações, devido à condição de favorecimento da posição plana na fusão do chanfro. À medida que a poça saiu da condição de apenas favorecimento da força gravitacional, depois da 1h, o operador voltou com a regulagem para 28 cm/min, a mesma que foi usada nos ensaios com CMT. No decorrer do restante do tubo, as variáveis não se alteraram e permitiram um ótimo desenvolvimento da poça de fusão, sem apresentar qualquer indício de perfuração.

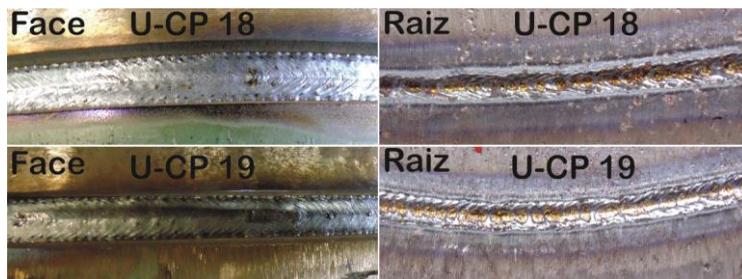


Figura 56 - Soldas em tubos de 18” - versão CCC – V_a 4,4 m/min

Para a comparação, amostras macrográficas foram preparadas e analisadas visualmente. Ambas as amostras

apresentaram boas condições de fusão do metal de adição em relação ao metal de base, com fusão total no chanfro e aspecto superficial de pouca convexidade, sem promover restrições para passes subsequentes. A única descontinuidade observada foi o aparecimento de poro pontual, tanto em uma amostra da versão CCC, quanto em uma amostra da versão CMT. A comparação citada pode ser vista na Figura 57, nas macrografias do CCC, com a Figura 58 do CMT.

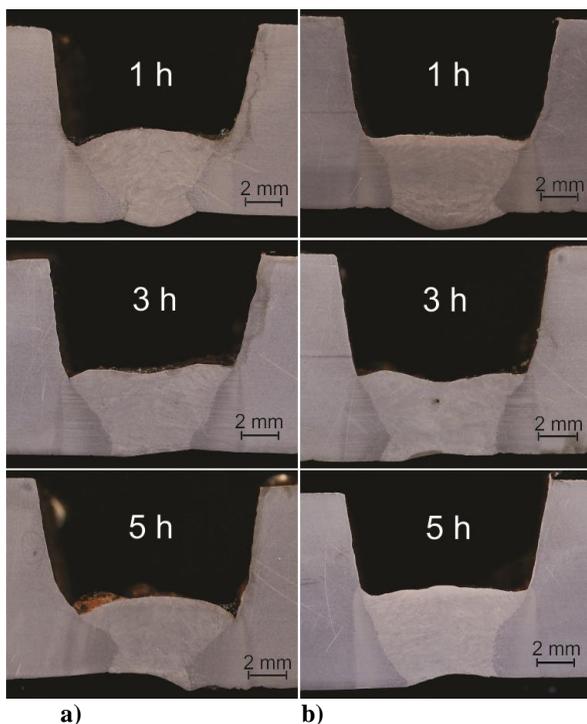


Figura 57 - Macrografias CCC com V_a 4,4 m/min- a) U-CP 18; b) U-CP 19

Na comparação das medidas dos cordões, valores como de espessura e principalmente de área de metal fundido apresentaram comportamento similar, sem muitas variações em todos os valores médios. Esses valores comparativos estão apresentados Tabela 24.

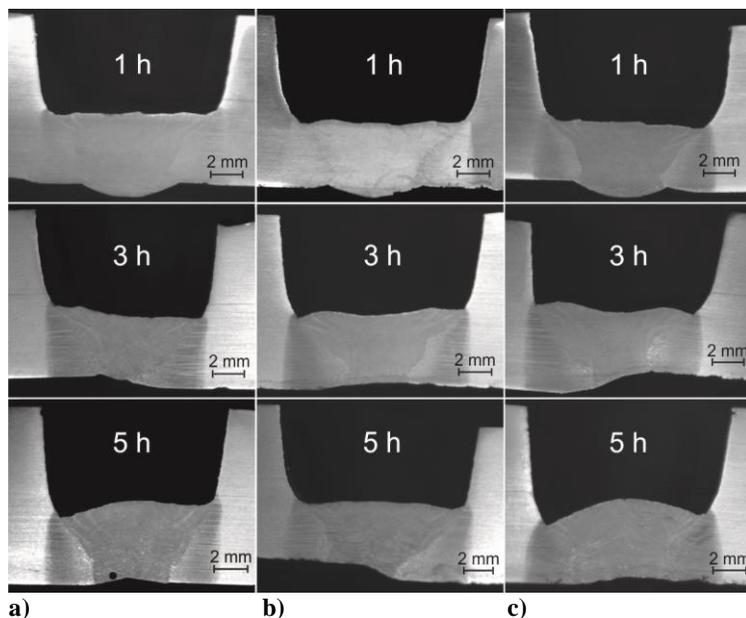


Figura 58 – Macrografias CMT - Tubo 18" - a) CMT-U-CP 03; b) CMT-U-CP 04; c) CMT-U-CP 05

Nos dados adquiridos com o SAP, dados esses que constituem valores médios instantâneos, foi observado uma similaridade nos valores plotados. A diferença média observada é menor que 10% em todas as variáveis que foram realizadas as aquisições. O gráfico comparativo está exposto na Figura 59.

As duas versões mostraram atender bem às condições do chanfro proposto, inclusive na compensação de desalinhamentos. O que pôde ser observado foi a geração de resultados similares na geometria de fusão no chanfro, com boa estabilidade na transferência metálica, repetibilidade e robustez do procedimento.

Tabela 24 - Valores de raiz com CCC e CMT - Chanfro U - Tubo 18" – espessura 7/16"

Corpo de Prova U										
	Posição [h]	Espessura Cordão [mm]	Espessura Efetiva [mm]	Largura Face [mm]	Convexidade Face [mm]	Altura do Reforço da Raiz [mm]	Largura do Reforço da Raiz [mm]	Concavidade Interna [mm]	Desalinamento [mm]	Área de Metal Fundido [mm ²]
Versão CCC										
CP 18	1	5,7	3,8	9,1	0,8	0,6	4,1	0,0	0,8	30,6
	3	3,8	3,8	10,1	0,6	0,0	7,1	0,2	0,4	31,9
	5	4,4	3,0	9,4	1,1	0,0	5,0	0,4	1,4	27,3
CP 19	1	5,4	3,9	9,5	0,0	1,2	6,8	0,0	0,3	36,1
	3	4,6	3,9	9,6	0,5	0,0	4,7	0,0	0,4	32,8
	5	5,1	4,4	9,1	0,5	0,0	5,0	0,4	0,4	33,9
Versão CMT										
CP 03	1	5,5	4,4	9,8	0,0	0,9	5,8	0,0	0,0	34,7
	3	4,2	3,3	9,5	0,0	0,0	1,4	0,0	1,1	21,3
	5	4,8	3,7	9,5	0,7	0,0	4,6	0,4	0,0	31,4
CP 04	1	4,8	3,7	10,6	0,0	0,9	4,5	0,0	0,0	30,7
	3	4,3	4,1	10,4	0,4	0,0	4,0	0,0	0,8	29,4
	5	4,6	4,1	10,0	0,4	0,0	4,3	0,5	1,6	33,4
CP 05	1	5,0	3,3	9,7	0,0	0,9	5,9	0,0	0,8	30,6
	3	4,3	3,4	10,5	0,5	0,0	3,9	0,2	1,8	30,5
	5	4,9	3,1	10,6	1,4	0,0	5,6	0,3	0,6	35,4

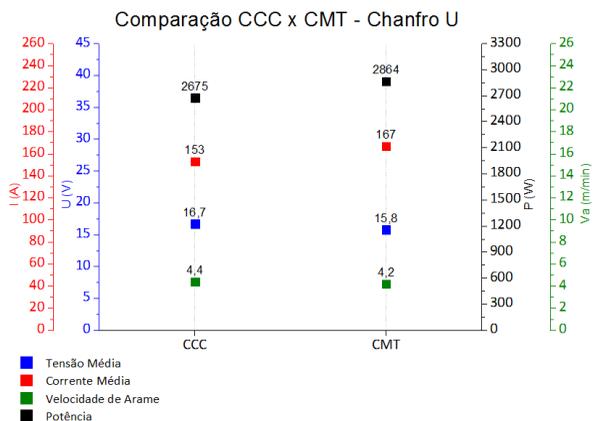


Figura 59 – Comparativo das aquisições com SAP

7 DESENVOLVIMENTO E MELHORIA DE EQUIPAMENTOS

Como consequência da experiência e de todas as dificuldades advindas do DESAFIO PETROBRAS, explanado na seção 3.1, e também oriundas de todos os ensaios executados para a realização deste trabalho, chegou-se a novos avanços com relação aos equipamentos para soldagem orbital mecanizada – como trilhos, tochas, suporte de tochas, desenvolvimento na comunicação e programação entre a fonte e o manipulador robótico – e também a uma nova concepção de equipamento orbital.

O levantamento das necessidades criou condições e ambientes para que se concretizassem as melhorias dos equipamentos. A partir das investigações realizadas, o autor atuou especificamente no subsídio de informações para a equipe de projetos do LABSOLDA, relatando as dificuldades e dando *feedbacks* para a atuação em pontos específicos dos sistemas, com um objetivo macro de contribuir para o desenvolvimento do ciclo evolutivo do laboratório para a soldagem orbital.

Um dos equipamentos que apresentava muitas dificuldades de manuseio era o trilho que o manipulador percorria. Uma nova concepção de acoplamento e ajuste rápido trouxe agilidade ao processo e com minimização de ajustes quanto às irregularidades no tubo, o que fez diminuir a atuação do operador do manipulador no controle da DBCP. A nova concepção de trilho orbital se diferencia da antiga, já citada na seção 3.1, em vários aspectos construtivos, tais como seus sistemas de fixação e de espaçadores e seu peso, propiciando assim um manuseio mais facilitado para o operador. A imagem da Figura 60 mostra essa evolução.

A questão das tochas utilizadas nos sistemas orbitais sempre foi crítica. Em função de a cultura industrial brasileira ainda se ater muito à aplicação manual de processos de soldagem, as tochas MIG/MAG mais encontradas são as de “pescoço curvo”, de emprego mais ergonômico para o soldador. A parcela das aplicações que é executada de forma automatizada, em sua grande maioria, é realizada com robôs antropomórficos, os quais têm força e robustez para trabalhar com tochas mais pesadas e sem a obrigatoriedade do pescoço curvo. Neste contexto, verifica-se que ambos os modelos de tocha não são adequados

para utilização em um manipulador de soldagem orbital, uma vez que as tochas mais leves apresentam curvatura em seu pescoço – o que dificulta sua fixação; já as tochas retas têm maior peso – o que é agravado pela alavanca do peso do mangote.



Figura 60 - Evolução dos trilhos orbital; Sistema ágil de acoplamento no tubo

Até poucos anos atrás (antes de 2010), como estas tochas eram as únicas alternativas, os desenvolvimentos vinculados à soldagem orbital eram de certa forma limitados em função dos aspectos supracitados. No entanto, ciente desta problemática, a equipe do LABSOLDA buscou soluções no mercado internacional. Nesse sentido, foram adquiridas da empresa SPA tochas de dimensões mais compactas destinadas à aplicação

mecanizada, as quais, mediante algumas adaptações, foram incorporadas aos sistemas de soldagem orbital do LABSOLDA.

Para os ensaios de soldagem realizados neste trabalho, no DESAFIO PETROBRAS (seção 3.1), foi verificada uma grande dificuldade na aplicação de um dos modelos de tocha da SPA, tocha número 1 da Figura 13, em razão de várias soldas apresentarem problemas com porosidade. Já para os outros ensaios realizados (capítulo 6), a tocha utilizada foi o modelo aletado da marca SPA, tocha número 2 da Figura 13, a qual teve um bom desempenho quando aplicada na soldagem de raiz. Uma limitação da utilização dessa tocha é em razão de os seus consumíveis serem encontrados apenas no exterior, o que aumenta o custo e o tempo de compra. Diante de todas as problemáticas levantadas e requisitos definidos pelo autor, a equipe de projeto mecânico do LABSOLDA, na busca por uma solução nacional e com atributos ainda mais apropriados para a aplicação em questão, desenvolveu um modelo extremamente compacto de tocha MIG/MAG. Com isso, foi possível a incorporação de um circuito de refrigeração, que pode ser feito tanto a gás (ar comprimido ou gás do processo) quanto à água, o que representa um ganho em relação às tochas da empresa SPA, as quais são consideradas “secas”. A possibilidade de refrigeração permite emprego de maiores energias de soldagem e/ou maiores ciclos de trabalho, o que representa algo interessante para a pesquisa – principalmente quando se pensa na aplicação de soldas de preenchimento nos tubos. Nesta tocha, são utilizados os consumíveis padrão encontrados na indústria brasileira (bocal, bico de contato, porta bico e difusor de gás). A Figura 61 mostra a comparação geral em relação ao tamanho das tochas referidas acima.

O projeto de uma tocha dedicada ao sistema orbital permitiu também a compacidade necessária para o desenvolvimento de um suporte de tocha integrado, permitindo o fácil ajuste da orientação da tocha, o que se dá pela regulagem dos denominados ângulos de ataque e de trabalho. O grande diferencial do sistema desenvolvido reside no fato de que ambas as regulagens mantém a ponta da tocha no mesmo lugar, algo que facilita muito o posicionamento da tocha na junta a ser soldada e aproveita melhor os cursos dos eixos do manipulador. O desenho esquemático da Figura 62 mostra o suporte e a sua liberdade de regulagem para a tocha.

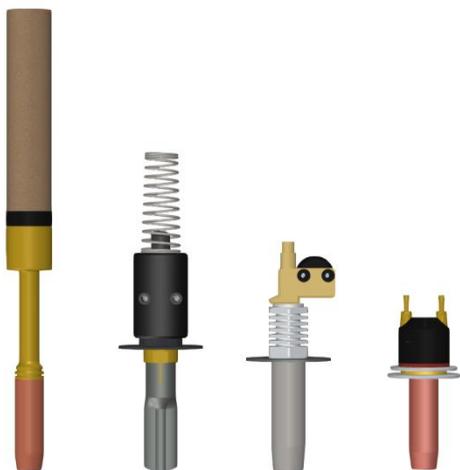
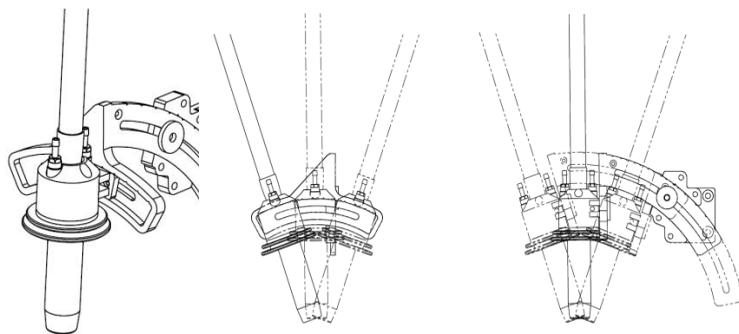


Figura 61 - Tochas de soldagem: tocha reta; tocha *Narrow Gap* SPA; tocha aletada SPA; tocha compacta desenvolvida no LABSOLDA; respectivamente da esquerda para direita



a) Suporte de tocha; (b) regulagem do ângulo de ataque; (c) regulagem do ângulo de trabalho

Outro equipamento que surgiu mediante as necessidades levantadas dos ensaios foi um sistema de acoplamento e alinhamento interno dos tubos. Equipamentos para essa finalidade utilizados em campo, normalmente, possuem grande peso e tamanho, além de serem equipamentos que funcionam ou com

sistema pneumático ou com sistema hidráulico, dificultando a sua utilização em laboratório. Pensando nessa abordagem, a equipe de projetos desenvolveu um modelo simplificado, específico para a utilização em ensaios no laboratório. Esse modelo é compacto e relativamente leve, comparado aos modelos comerciais, e ainda assim, seu sistema de funcionamento é puramente mecânico. A acopladeira é mostrada em detalhe na Figura 63.

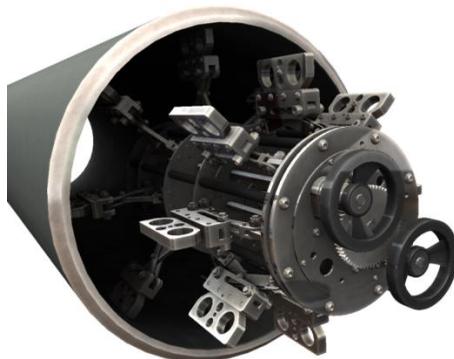


Figura 63 - Acopladeira interna de tubos

A Figura 64 traz uma visão geral dos equipamentos já desenvolvidos no LABSOLDA, inclusive alguns utilizados nesse trabalho, montados em sistema completo de soldagem orbital.

Aliado à prática contínua da filosofia do laboratório, que busca incessantemente a melhoria contínua dos equipamentos dedicados à automatização da soldagem, o autor desse trabalho contribui com informações a partir dos resultados obtidos, por meio de suas aplicações, para o desenvolvimento de uma nova concepção de equipamento para soldagem orbital. Essa nova concepção, mostrada na Figura 65, tende a deixar o sistema como um todo mais robusto, mais confiável e apropriado para as aplicações industriais da soldagem orbital MIG/MAG. O equipamento também poderá ser adaptável a outros processos, como, por exemplo, TIG e também a sistemas MIG/MAG mais produtivos com a adaptação de duas tochas.

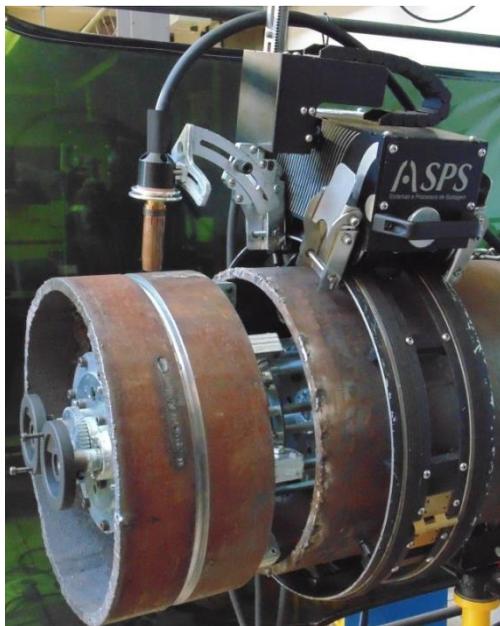


Figura 64 - Bancada de soldagem orbital



Figura 65 - Nova concepção de sistema orbital LABSOLDA

Todos os equipamentos desenvolvidos, específicos para a aplicação orbital, acabam representando um legado para novas pesquisas nessa área, o que facilitará e agilizará as atividades dos pesquisadores na busca da melhoria contínua dos procedimentos de soldagem. Além dos fatos mencionados, novos produtos também vislumbram sua aplicação no cenário industrial brasileiro, contribuindo assim para que o Brasil deixe de ser refém de tecnologias importadas no ramo da soldagem.

8 CONCLUSÕES

O presente trabalho representa importante contribuição para o desenvolvimento da tecnologia da soldagem orbital destinada a passes de raiz em tubos. O realismo prático das aplicações criou ambientes propícios para todo o desenvolvimento deste trabalho, cujo levantamento de informações é de total representatividade para a abrangência e a evolução da instituição LABSOLDA.

Primeiramente, por meio da participação no DESAFIO PETROBRAS e, na sequência, com a realização de inúmeras tentativas práticas na soldagem orbital, o autor se submeteu a um processo de contínua aprendizagem com as dificuldades inerentes a todo esse processo. Com as investigações em equipamentos comerciais e nos equipamentos desenvolvidos dentro do laboratório, pôde-se contribuir de forma contundente no subsídio de informações para a equipe de projetos, a qual desenvolveu e vem desenvolvendo novos equipamentos e tecnologias para a soldagem orbital, como, por exemplo, uma nova concepção de manipulador robótico.

Quanto à verificação das variáveis de movimentação do Tartilope V3, os resultados mostraram que o equipamento utilizado nos ensaios é confiável e apresentou um bom desempenho dinâmico em todas as situações analisadas. A comprovação deu-se por intermédio de diferentes métodos de verificação. O novo conceito metodológico desenvolvido, o método da filmagem, aliado ao método de verificação pela análise de imagem do osciloscópio e ao método com sensor de deslocamento, todos apresentaram valores de simulação do equipamento orbital em distintas situações, com mínimas variações. Na análise dos resultados, o valor mais expressivo foi para a variável amplitude de tecimento, a qual teve alteração em torno de 10 % da medida inicial na posição plana em relação a posição final sobrecabeça. Essas mínimas variações, caso ocorram durante a realização da soldagem, não devem ser o causador de qualquer descontinuidade ou defeito que possa ocorrer na solda. Nessas situações, o procedimento de soldagem deve ser robusto o suficiente a fim de compensá-las.

A soldagem de raiz foi factível de ser realizada sem a utilização de *backing* tanto para o chanfro “V”, nas condições de

soldagem realizadas, mas principalmente para o chanfro “U”, com equipamento mecanizado.

Nas situações de soldagem de raiz apresentadas, três versões de processo MIG/MAG foram utilizadas: o CCC, o CMT e o STT. Todas as versões apresentaram bons resultados quanto à estabilidade no destacamento das gotas, constatado por intermédio dos oscilogramas das soldas. Constatou-se a importância de ter uma transferência estável e regular para a não formação de defeitos na raiz dos tubos.

Para o chanfro “V”, a soldagem realizada com as versões CCC e STT apresentaram bons resultados quanto ao perfil geométrico de fusão. Porém, em todas as situações de soldagem, as juntas montadas não apresentaram irregularidades comuns encontradas em campo, como desalinhamentos e/ou variações de abertura de raiz – o que, de fato, contribuiu para os bons resultados obtidos.

Já a soldagem com a versão CMT não teve um bom desempenho para o chanfro “V”. Para os ensaios realizados nesse tipo de chanfro, a versão mostrou ser vulnerável a dar defeitos como falta de fusão, até mesmo em posições favoráveis de soldagem no tubo, como a posição plana. A hipótese foi levantada com base em análises oscilográficas, nas quais se percebeu que o mecanismo de transferência da gota influencia de forma negativa para a fusão nesse tipo de material e tipo de chanfro. O fato é que, durante a transferência metálica, o tempo em curto-circuito relativo ao período total é de aproximadamente 45 %. Esse tempo considerável, associado ao fato de o mecanismo retraindo o arame, fazendo com que a tensão superficial na ponte metálica gere uma força contrária ao destacamento, pode ter contribuído no efeito da suscetibilidade da poça em não fundir adequadamente. Somando-se aos fatos mencionados, o chanfro “V” apresenta uma quantidade maior de material comparada ao chanfro “U”, o que faz dissipar mais rapidamente o calor e dificultar a fusão nos flancos do chanfro. A tendência da falta de fusão foi constatada nos resultados das soldas com a versão CMT para o chanfro “V”.

Do ponto de vista de aplicação, o chanfro “U” foi muito mais robusto e confiável em todas as situações de ensaios, comparado às soldas com chanfro “V”. A vantagem de se utilizar esse tipo de chanfro é o fato de que se podem encostar as duas partes do tubo, sem a necessidade de deixar qualquer abertura de

raiz – o que é benéfico para as aplicações em campo pela dificuldade de alinhamento e posicionamento de tubos com grande comprimento. Nesse chanfro, as duas versões MIG/MAG exploradas foram o CCC e o CMT, ambos com ótimos resultados. Mesmo em situações de desalinhamentos dos tubos (*High-Low*), o procedimento compensou as variações e os resultados, atendendo às condições impostas pelas normas aplicadas à construção de dutos. As duas versões foram comparadas entre si na situação imposta de soldagem para tubos de 18”, apresentando similaridade com relação ao perfil geométrico de fusão no chanfro “U” e suas medidas finais.

No que tange ao CCC, versão esta que é um desenvolvimento tecnológico interno do laboratório, os bons resultados em diferentes diâmetros e espessuras de tubos comprovam sua robustez e confiabilidade, tornando a versão aplicável no ambiente industrial e de fácil operação quanto à sua regulagem. Os bons resultados foram observados e documentados em EPS, disponíveis nos apêndices desse trabalho. Os procedimentos de soldagem desenvolvidos com o CCC atendem a uma diversidade ampla de tubos, como, por exemplo, os de diâmetros de 16”, de 18” e de 22” e espessuras diferentes 7/16”, 1/2” e 1 1/4”. Para os tubos acima referidos, são necessárias regulagens com mínima interferência de operação, nas quais o operador de soldagem atuaria mais como conferente do *setup* inicial do procedimento, sem a necessidade de muita atuação em correções durante a soldagem. Os ensaios realizados comprovam a aplicação do CCC para o passe de raiz sem a utilização de *backing*, aplicação esta que foi vislumbrada há muitos anos dentro do laboratório e vem sendo incessantemente pesquisada ao longo da história do LABSOLDA, chegando-se à sua concretização nos dias atuais.

9 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Os procedimentos de raiz em tubos apresentados neste trabalho mostram grande potencial para a continuidade de pesquisas no desenvolvimento de procedimentos mais robustos e confiáveis não só para o passe de raiz, mas também para o preenchimento das juntas com chanfro “U”. Aspectos quanto a uma maior automatização e controle do procedimento, controle de trajetória e controle da altura da tocha com sistemas de sensoramento a laser são factíveis de serem analisados, visto a facilidade de operação e robustez desse tipo de chanfro.

Para uma análise mais contundente das hipóteses levantadas com relação à versão CMT em tubos da especificação API 5L, faz-se necessário um entendimento mais preciso quanto ao aspecto térmico e ao comportamento da poça no mecanismo de transferência metálica dentro do chanfro “V”. Esse comportamento poderá ser analisado por meio de filmagens térmicas e filmagens de alta velocidade para verificar a incidência da gota na fusão dos flancos do chanfro.

Para o CCC, sugere-se a aplicação desta versão com maiores regulagens de V_a , a fim de se obter uma transferência com maior energia e, com isso, utilizar o chanfro “U” com maiores espessuras de nariz. Outro fator que pode influenciar para uma maior produtividade é a utilização de gases com maior quantidade de CO_2 .

REFERÊNCIAS

1. BRAGA, B. **O mundo do petróleo e o petróleo do mundo.** *Macaé Offshore*, Macaé - RJ, v. 84, n. XIV, p. 14 a 16, 2015.
2. OFUGI, F. **Investimentos:** Brasil Recebe Apenas 6% dos Investimentos Globais em O&G. 22 Setembro 2015. Disponível em:
<<http://www.camaras.org.br/site.aspx/Detalle-de-Noticias-SRRJ?codNoticia=d/opsv55cSA=>>.
Acesso em: 03 Novembro 2015.
3. TRANSPETRO. **Dutos e Terminais 2015.**
Disponível em: <http://www.transpetro.com.br/pt_br/areas-de-negocios/terminais-e-oleodutos.html>.
Acesso em: 03 Novembro 2015.
4. TRANSPETRO. **Gás Natural 2015.**
Disponível em: <http://www.transpetro.com.br/pt_br/areas-de-negocios/gas-natural.html>.
Acesso em: 03 Novembro 2015.
5. ILOS. **Transporte Dutoviário de Combustíveis no Brasil: Desafios e Oportunidades.** Abril 2014.
Disponível em: <<http://www.ilos.com.br/web/transporte-dutoviario-de-combustiveis-no-brasil-desafios-e-oportunidade/>>. Acesso em: 04 Novembro 2015.
6. PEDROSA, O. **Brasil Pode Melhorar Posição no Cenário Global de Petróleo e Gás.** 23 Setembro 2015.
Disponível em: <<http://www.riopipeline.com.br/brasil-pode-melhorar-posicao-no-cenario-global-de-petroleo-e-gas/>>.
Acesso em: 03 Novembro 2015.
7. EMMERSON, J. G. **Fcaw Orbital Pipe Welding Technology Improves Fab Shop Productivity.** *Welding Journal*, v. 78, n. 11, p. 57 - 59, Nov. 1999.
8. SILVA, R. H. G. E. **Soldagem MIG/MAG em Transferência Metálica por Curto-Circuito Controlado Aplicado ao Passe de Raiz.** Florianópolis SC: Dissertação de Mestrado - UFSC, 2005.

9. COURT, S. A.; POLLARD, G. **Inclusion Chemistry and Morphology in Shielded Metal Arc (SMA) Steel Weld Deposits.** *Elsevier Science Publishing*, p. 219-243, May 1989.
10. DUTRA, J. C.; SILVA, R. G. E. **MIG-MAG - Transferência Metálica por Curto-Circuito sob Controle da Forma de Onda da Corrente - Sistemas CCC e STT - Fundamentos.** *Soldagem e Inspeção*, v. 13, n. 2, p. 92-96, 2008.
11. SILVA, R. H. G. E. et al. **Soldagem e sua Automação na Indústria de Petróleo e Gás – Recentes Desenvolvimentos do Labsolda/UFSC.** *4o PDPETRO*, Campinas - SP, 21-24 Out. 2007.
12. NARA, Y et al. **Production of Line Pipe in Japan.** *Metals Technology*, v. 10, p. 322 - 329, Aug. 1983.
13. GORNI A. A. et al. **Metalurgia dos Aços Microligados Usados em Tubos Soldados de Grande Diâmetro.** *Corte & Conformação de Metais*, p. 50 - 63, Mar. 2010.
14. MALIN, V. Y. **The State-of-the-Art of Narrow Gap Welding.** *Welding Journal*, v. 62, n. 6, p. 37 - 46, Jun. 1983.
15. PARANHOS, R. P. R. **Como Criar um Ambiente de Inovação na Pesquisa em Tecnologia da Soldagem no Brasil?** *Soldagem & Inspeção*, v. 13, n. 2, p. 166 - 171, Abr./Jun. 2008.
16. ESAB. **Soldagem de Tubulações.** 2004.
17. PENN ENERGY. **TAP Launches Pre-Qualification for Onshore Pipeline Construction Companies**, May 2014. Disponível em:
<<http://www.pennenergy.com/articles/pennenergy/2014/05/tap-launches-pre-qualification-for-onshore-pipeline-construction-companies.html>>. Acesso em: 07 Abril 2015.
18. GAZPROM. **The Energy Thoroughfare of the Olympic Games.** Abril 2010. Disponível em:
<<http://www.gazprom.com/press/reports/2010/dls/>>. Acesso em: 07 Abril 2016.

19. YAPP, D.; BLACKMAN, S. A. **Recent Developments in High Productivity Pipeline Welding.** *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. XXVI, n. 1, p. 89-97, 2004.
20. BEESON, R. **Pipeline Welding Goes Mechanized.** *Welding Journal*, v. 78, n. 11, p. 47 - 50, Nov. 1999.
21. AICHELE, G.; BÄR, M. **Orbital Welding - Solutions for Demanding Welding Tasks (Part 2).** *Welding and Cutting*, v. 05, p. 252 - 255, 2005.
22. PENNISTON, C. **Pipelining With Precision: Mechanized Welding That Consistently Meets the Challenging Needs of the Canadian Pipeline Industry.** *Canadian Welding Association Journal*, n. Spring, p. 12 - 29, 2013.
23. EMMERSON, J. G. **Maximizing a productivity tool for large-pipe welding.** *The Fabricator*, v. Aug. 2007.
24. NELSON, J. **Maximizing Pipeline Welding Efficiency.** *Welding Journal*, v. 92, n. 6, p. 74, Jun. 2013.
25. HUDSON, M. G. **Welding of X100 Linepipe.** Cranfield, UK: PhD Thesis, 2004.
26. POLYSOUDE. **The orbital welding handbook.** Nantes, France, 2009.
27. LABSOLDA. **Vídeo Tartilope V2F Orbital.** SPS - Sistemas e Processos de Soldagem, 2012.
Disponível em:
<http://www.sps-soldagem.com.br/tartilope_v2f_orbital.php>. Acesso em: 11 Março 2016.
28. PIGOZZO, I. O. **Soldagem TIG Orbital: Otimização de Equipamentos e Prospecções Tecnológicas para Procedimentos de Passe de Raiz.** Florianópolis - SC: Dissertação de Mestrado, UFSC, 2015.
29. MENDONÇA, F. K. **Evolução da Técnica de Seguimento de Junta Via Sensoriamento do Arco para Operações de Soldagem em Posições Forçadas.** Florianópolis - SC: Dissertação de Mestrado, UFSC, 2013.
30. BRÜGGEMANN, L. C. **Investigações Prospectivas em Processos e Técnicas para o Passe de Raiz na Soldagem MIG/MAG Orbital para a Construção de Dutos.** Florianópolis: Trabalho de Conclusão de Curso, UFSC 2013.

31. KIM, C. **Back Bead Characteristics during Butt Welding of a Thick Plate for Various Backing Conditions.** *Materials Science Forum*, Switzerland, v. 654-656, p. 350-353, Jun. 2010.
32. BLACKMAN, S.; DORLING, D. V. **Capabilities and limitations of mechanised GMAW systems for transmission pipelines.** *1ª International Conference on Weld Metal Hydrogen Cracking in Pipeline Girth Weld.* Wollongong, Australia, p. 19, Mar. 1999.
33. STAVA, E. K. **A new, low spatter arc welding machine.** *Welding Journal*, p. 25-29, Jan. 1993.
34. UUSITALO, J. **A New Welding Process for Root.** *Kemppi ProNews*, v. 2, p. 4 - 6, 2006.
35. CUHEL, J. **GMAW Options Offer Increased Productivity for Pipe Fab Shops.** *Welding Journal*, USA, v. 87, n. 6, p. 66 - 68, Jun. 2008.
36. PÉPE, N. V. D. C. **Advances in Gas Metal Arc Welding and Application to Corrosion Resistant Alloy Pipes.** Cranfield, UK: PhD Thesis, 2010.
37. TOGUYENI, G. A. et al. **High Strength Carbon Steel and CRA Lined Pipe for Reel-Lay Installation.** *Offshore Technology Conference*, Texas, USA, 6-9 May 2013.
38. BADHEKA, V. J.; AGRAWAL, S. K. **Microstructural Investigation of Weld Metal in Low-Carbon Steel Welded by NG-GMAW.** *Welding and Cutting*, v. 4, p. 199 - 206, 2009.
39. API 1104. **Welding of Pipelines and Related Facilities.** 21ª. ed. 2013.
40. ASME B 31.3. **Pressure Piping.** 2008.
41. ISO 5817. **Welding — Fusion-welded joints in steel - Quality levels for imperfections.** 2ª. ed. 2003.
42. AMIN, M. **Synergic Pulse MIG Welding.** *Metal Construction*, p. 349 - 353, 1981.
43. SILVA, R. H. G. e.; DUTRA, J. C.; GOHR JR, R. **Fundamentos Científicos e Tecnológicos para o Desenvolvimento do Processo MIG/MAG por Curto Circuito Controlado - Parte 2.** *Soldagem e Inspeção*, v. 12,

n. 4, p. 326-335, 2007.

44. MOREIRA, A. R. et al. **Líquidos: Mudanças de estado e propriedades coligativas.** Salvador. UNIFACS 20/07/1999. Relatório.
45. DIRENE FILHO, H. **MIG/MAG CCC - Avanços na Tecnologia de Controle da Transferência Metálica como Solução para o Passe de Raiz.** Florianópolis SC: Dissertação de Mestrado, UFSC, 2014.
46. SILVA, R. H. G. e.; DUTRA, J. C.; GOHR JR, R. **Fundamentos Científicos e Tecnológicos para o Desenvolvimento do Processo MIG/MAG por Curto Circuito Controlado (CCC) - Parte 3.** *Soldagem e Inspeção*, v. 13, n. 1, p. 70-81, Jan/Mar 2008.
47. KVASOV, F. V. **Special features of mechanised welding with controlled electrode metal transfer.** *Welding International*, v. 14, n. 2, p. 158-161, 2000.
48. FRONIUS. **CMT: The new revolution in digital GMA welding.** Disponível em:
<http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-6F72238A-DEF5A15E/fronius_usa/22_cmt_the_new_revolution_in_digital_gma_welding_gb.pdf>. Acesso em: 24 Julho 2015.
49. MARQUES, C. **Prospecções da Natureza Física da Soldagem MIG Automática de Ligas de Alumínio.** Florianópolis SC: Dissertação de Mestrado - UFSC, 2013.
50. FBTS. **Memorial Descritivo.** 001/2014, Anexo 1, 2014.
51. DREHER, M. et al. **Methods and results concerning the shielding gas flow in GMAW.** *Weld World*, Dresden, Germany, n. 391 - 410, Mar. 2013.
52. MAGNATECH. **MIG/MAG (GMAW/FCAW)**
Disponível em:<http://magnatech-international.com/product_types/mig/>. Acesso em: 02 May 2016.
53. MAGNATECH. **Pipelinier II**
Disponível em:< www.magnatechllc.com/head-pipelinier.php#tabs1-html>. Acesso em: 18 Out. 2014.
54. BAIXO, C. E. I. **Estudo da soldagem MIG/MAG pela técnica hiperbárica a seco.** Florianópolis - SC : Tese de Doutorado - UFSC, 1999.

55. GOHR JR, R. **Novos Métodos de Controle da Soldagem MIG/MAG**. Florianópolis - SC: Tese de Doutorado - UFSC, 2002.
56. IMC-SOLDAGEM. **Operação CCC**. Florianópolis - SC. 2015. Relatório Interno.
57. SPS-SISTEMAS E PROCESSOS DE SOLDAGEM. **Tartilope V4**. Disponível em: <www.sps-soldagem.com.br/tartilope_v4.php>. Acesso em: 16 out. 2014.
58. AWS 3.0. **Standard Welding Terms and Definitions**. 12^a Edition, 2010.
59. GONÇALVES JR., A. A.; SOUZA, A. R. **Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial**. 1^a Edição. Editora Manole, Florianópolis SC, 2008.
60. SCOTTI, A.; PONOMAREV., V. **Soldagem MIG/MAG - Melhor Entendimento, Melhor Desempenho**. 2^a Edição. Artliber Editora, São Paulo, 2008.
61. FOKENS, R. **Cold Metal Transfer - CMT - A Revolution in Mechanized Root Pass Pipeline Welding**. *4th Pipeline Technology Conference 2009*, Hannover, Germany, 22-23 April 2009.

APÊNDICE A



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
INSTITUTO DE SOLDAGEM E MECATRÔNICA



Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS)

Data: 02/05/2016

Revisado por: Francisco Sartori.

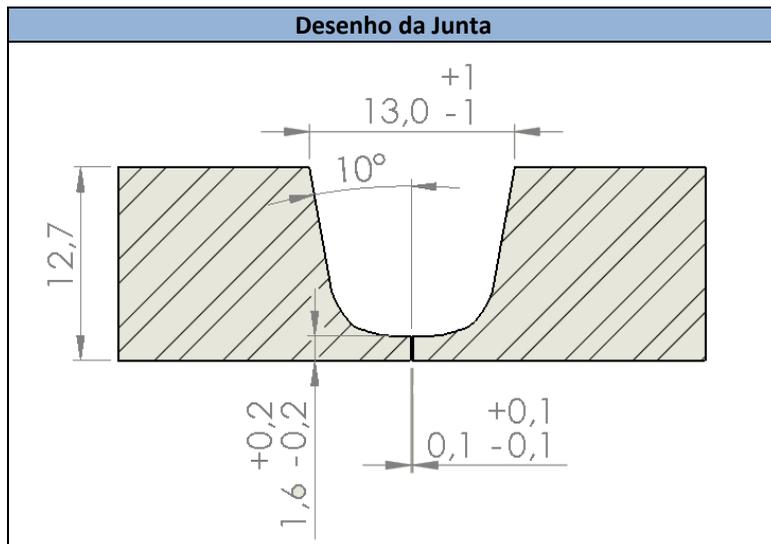
Aprovado por:

Objetivo do procedimento

Soldagem de raiz aplicada em tubos com sistema MIG/MAG orbital mecanizado.

Dados Gerais

Processo de soldagem	MIG/MAG
Versão do processo	CCC – Curto-Circuito Controlado
Material de base	API 5L – Grau B
Diâmetro do tubo	16" (406,4 mm) – 18" (457,2 mm)
Espessura	½" (12,7 mm) – 7/16" (11,1 mm) respectivamente
Tipo de junta	U
Abertura de Raiz (<i>Gap</i>)	0,0 - 0,2 mm
Posição de soldagem	5G
Desalinhamento dos tubos (<i>High-Low</i>)	Máx. 3 mm
Material de adição	ER 70S-6
Diâmetro arame	1,2 mm
Gás de proteção	C 25 – (75% Ar + 25% CO ₂)
Vazão de gás	15 L/min
<i>Backing</i> (cobre-junta)	NA
Alinhamento	Acopladeira Interna



Variáveis de posicionamento e de movimento	
Tipo do manipulador	Tartilope V3
Velocidade de soldagem	28 – 31 cm/min
Progressão	Descendente
Tipo de tecimento	Triangular
Frequência de tecimento	1,0 – 1,4 Hz
Amplitude de tecimento	3,0 – 4,0 mm
Tempo de parada	100 – 150 ms em ambos os lados.
DBCP	15 – 17 mm

Detalhes da Tocha		
Tipo de tocha	SPA – Aletada – Sistema de fixação do bico de contato com pinça. 	
Ângulo de ataque da tocha	10° - 12° Empurrando	
Ângulo de trabalho da tocha	Perpendicular	
Bico de contato	Bico de contato SPACE MAG SPA – 1,2 mm – Sem rosca 	
Bocal	Bocal Cônico MIG/MAG 20 mm – SPA 	
Relação do bico de contato ao bocal	Na mesma linha, rente ao bocal. 	
Variáveis de Soldagem		
Fonte de soldagem	IMC – Digiplus A7	
Programa Sinérgico	CCC – Aço Carbono - C25 - 1,2 mm	
Velocidade de arame	3,3 m/min	4,4 m/min
“a”	30	30
Cta	1,0	0,4
Ckr	0,0	0,0

APÊNDICE B

Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS)

Data: 02/05/2016

Revisado por: Francisco Sartori.

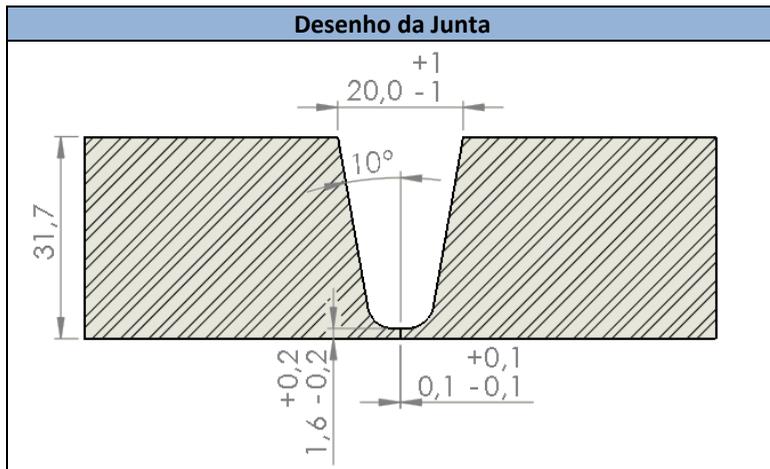
Aprovado por:

Objetivo do procedimento

Soldagem de raiz aplicada em tubos com sistema MIG/MAG orbital mecanizado.

Dados Gerais

Processo de soldagem	MIG/MAG
Versão do processo	CCC – Curto-Circuito Controlado
Material de base	API 5L – X70 MS
Diâmetro do tubo	22" (558,8 mm)
Espessura	1 ¼" (31,7 mm)
Tipo de junta	U
Abertura de Raiz (<i>Gap</i>)	0,0 - 0,2 mm
Posição de soldagem	5G
Desalinhamento dos tubos (<i>High-Low</i>)	Máx. 3 mm
Material de adição	ER 70S-6
Diâmetro arame	1,2 mm
Gás de proteção	C 25 – (75% Ar + 25% CO ₂)
Vazão de gás	25 L/min
<i>Backing</i> (cobre-junta)	NA
Alinhamento	Acopladeira Interna



Variáveis de posicionamento e de movimento

Tipo do manipulador	Tartílope V3
Velocidade de soldagem	28 – 31 cm/min
Progressão	Descendente
Tipo de tecimento	Triangular
Frequência de tecimento	1,0 - 1,4 Hz
Amplitude de tecimento	3,0 - 4,0 mm
Tempo de parada	100 – 150 ms em ambos os lados.
DBCP	15 – 17 mm

Detalhes da Tocha		
Tipo de tocha	SPA – Aletada – Sistema de fixação do bico de contato com pinça. 	
Ângulo de ataque da tocha	10° - 12° Empurrando	
Ângulo de trabalho da tocha	Perpendicular	
Bico de contato	Bico de contato SPACE MAG SPA – 1,2 mm – Sem rosca 	
Bocal	Bocal Cônico MIG/MAG 20 mm – SPA 	
Relação do bico de contato ao bocal	20 mm para fora do bocal. 	
Variáveis de Soldagem		
Fonte de soldagem	IMC – Digiplus A7	
Programa Sinérgico	CCC – Aço Carbono - C25 - 1,2 mm	
Velocidade de arame	3,3 m/min	4,4 m/min
“a”	30	30
Cta	1,0	0,4
Ckr	0,0	0,0

APÊNDICE C

Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS)

Data: 02/05/2016

Revisado por: Francisco Sartori.

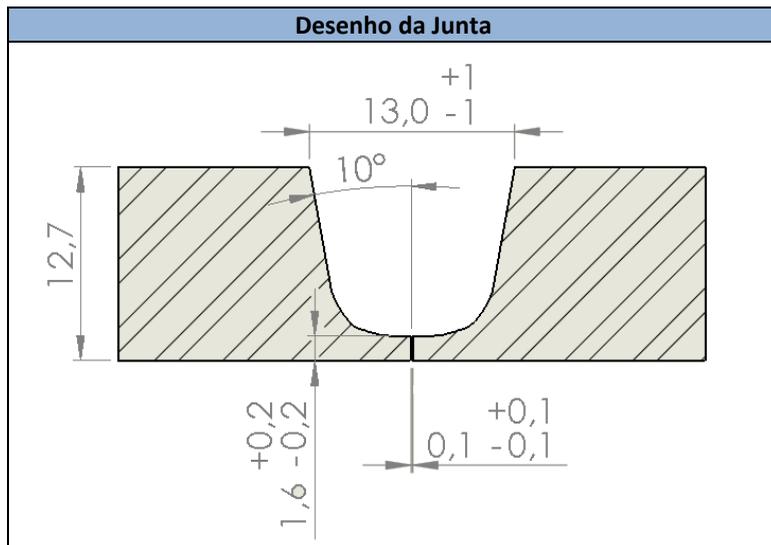
Aprovado por:

Objetivo do procedimento

Soldagem de raiz aplicada em tubos com sistema MIG/MAG orbital mecanizado.

Dados Gerais

Processo de soldagem	MIG/MAG
Versão do processo	CMT – <i>Cold Metal Transfer</i>
Material de base	API 5L – Grau B
Diâmetro do tubo	18" (457,2 mm)
Espessura	7/16" (11,1 mm)
Tipo de junta	U
Abertura de Raiz (<i>Gap</i>)	0,0 - 0,2 mm
Posição de soldagem	5G
Desalinhamento dos tubos (<i>High-Low</i>)	Máx. 3 mm
Material de adição	ER 70S-6
Diâmetro arame	1,2 mm
Gás de proteção	C 25 – (75% Ar + 25% CO ₂)
Vazão de gás	15 L/min
<i>Backing</i> (cobre-junta)	NA
Alinhamento	Acopladeira Interna



Variáveis de posicionamento e de movimento	
Tipo do manipulador	Tartílope V3
Velocidade de soldagem	28 – 31 cm/min
Progressão	Descendente
Tipo de tecimento	Triangular
Frequência de tecimento	1,0 – 1,4 Hz
Amplitude de tecimento	3,0 – 4,0 mm
Tempo de parada	100 – 150 ms em ambos os lados.
DBCP	15 – 17 mm

Detalhes da Tocha	
Tipo de tocha	<p>Tocha Fronius CMT – Push-Pull</p>  
Ângulo de ataque da tocha	10° - 12° Empurrando
Ângulo de trabalho da tocha	Perpendicular
Bico de contato	Bico de contato Fronius com rosca M 6
Bocal	<p>Bocal cônico MIG/MAG - 13 mm – Fronius</p> 
Relação do bico de contato ao bocal	<p>Bico de contato a 2 mm para dentro do bocal.</p> 
Variáveis de Soldagem	
Fonte de soldagem	Fronius CMT Advanced 4000R
Programa Sinérgico	G3Si – 1,2 mm – Ar CO ₂
Velocidade de arame	5,9 m/min
CA	20
CD	3