

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

RAMON NATAL MELLER

SOLDAGEM AUTOMATIZADA NA FABRICAÇÃO DO MCV DE  
ÁRVORES DE NATAL UTILIZADAS NA EXTRAÇÃO DE PETRÓLEO DO  
PRÉ-SAL

FLORIANÓPOLIS  
2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

RAMON NATAL MELLER

SOLDAGEM AUTOMATIZADA NA FABRICAÇÃO DO MCV DE  
ÁRVORES DE NATAL UTILIZADAS NA EXTRAÇÃO DE PETRÓLEO DO  
PRÉ-SAL

**Trabalho de Graduação apresentado ao  
Curso de Engenharia Mecânica da  
Universidade Federal de Santa Catarina  
como parte dos requisitos para obtenção  
do título de Engenheiro Mecânico.**

Orientador: Régis Henrique Gonçalves e Silva, Dr. Eng.

FLORIANÓPOLIS  
2015

RAMON NATAL MELLER

SOLDAGEM AUTOMATIZADA NA FABRICAÇÃO DO MCV DE  
ÁRVORES DE NATAL UTILIZADAS NA EXTRAÇÃO DE PETRÓLEO DO  
PRÉ-SAL

Este Trabalho de Graduação foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Mecânico e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

---

Prof. Dr. Carlos Henrique Niño Bohórquez  
Coordenador do Curso

---

Prof. Dr. Jonny Carlos da Silva  
Professor da disciplina

Comissão Examinadora:

---

Régis Henrique Gonçalves e Silva, Prof. Dr.  
Orientador

---

Cleber Marques, M..  
Membro

### Ficha Catalográfica

Meller, Ramon N., 1988 –

Soldagem Automatizada na Fabricação do MCV de Árvores de Natal Utilizadas na Extração de Petróleo do Pré-Sal, Ramon Natal Meller - 2015.

73 f.: il. color.; 30cm.

Orientador: Regis Henrique Gonçalves e Silva, Prof. Dr.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Curso de Engenharia Mecânica, 2015.

1. Petróleo 2. Soldagem automatizada 3. Pré-Sal

I. Silva, Regis Henrique Gonçalves. II. Universidade Federal de Santa Catarina, Curso de Engenharia Mecânica.

*“Algo só é impossível até que alguém duvide e resolva provar ao contrário.”*  
*Albert Einstein*

*Aos meus pais, Enio e Sedna,  
aos meus irmãos, Daiana e Eduardo,  
à minha noiva, Hellen.*

## AGRADECIMENTOS

Ao LABSOLDA por ter me preparado profissional e pessoalmente durante todos esses anos. Por ter me dado as oportunidades que tive e que ainda terei.

Ao meu orientador Prof. Dr. Régis Henrique Gonçalves e Silva, pelo apoio e orientação no trabalho e ao longo de minha carreira profissional.

Ao Prof. Dr. Jair Carlos Dutra, pelo exemplo quanto ao empenho pela busca do desenvolvimento nacional de tecnologia.

Ao Dr. Eng. Raul Gohr Jr., pelo apoio técnico e profissional no andamento das atividades.

Ao M. Eng. Cleber Marques, pelo auxílio e companheirismo no dia-a-dia dos trabalhos no laboratório.

Ao Prof. Dr. Renon Steinbach Carvalho, pelo aprendizado e pela parceria.

Ao M. Sc. Luciano Machado Cirino, pelo enorme aprendizado e companheirismo.

A toda equipe do LABSOLDA, Cleber Guedes (Clebão), Ricardo Campagnim (Índio Velho), Fernando Costenaro, Everton Werlang, Danilo Varasquim Ribeiro, Natália Wendt Devreck, Rafael Gomes Nunes da Silva, Guilherme de Santana Weizenmann, Francisco Sartori, Alberto Bonamigo Viviani, Rafael Costa Barbosa, Eduardo Bidese Puhl, Jônathas Alexandre Alves, Gustavo Luis de Sousa, Felipe Kalil Mendonça, Marcelo Pompermaier Okuyama, Flávio Goulart Berka, Mario Cesar do Nascimento Junior, Adrian Savaris, Adroaldo Savaris, Ezequiel Gonçalves, Luiz Suliman, Nelso Gauze Bonacorso, Joao Facco de Andrade, Cleide Maria Marqueze, Vinicius Eduardo de Melo Rubio.

Aos meus pais Enio e Sedna,

Aos meus irmãos, Daiana e Eduardo,

À minha noiva Hellen,

Muito obrigado a todos.

## RESUMO

A extração de petróleo, apesar dos avanços no desenvolvimento de combustíveis não fósseis, é ainda hoje um importante elemento para a forma de vida da sociedade contemporânea. O petróleo continua sendo a principal matéria prima para a fabricação de vários tipos de combustíveis utilizados atualmente em veículos automotores, na indústria, aviação, entre outros. No Brasil, por exemplo, o combustível mais utilizado em veículos automotores é o diesel [17], que provém da destilação do petróleo.

A grande maioria das reservas de petróleo do Brasil é submarina [16]. Parte delas no pré-sal. Para a extração é necessário todo um aparato que engloba a necessidade de embarcações, plataformas, tubulações e todo um conjunto de equipamentos para a extração e locomoção do petróleo até as refinarias.

Um dos elementos necessários para a extração do petróleo no mar é a árvore de natal. Ela é o módulo que é fixado à base do poço, no solo submarino. Tem por função realizar a retirada do petróleo dos poços e enviá-lo à central de bombeamento do petróleo da base marítima à superfície, chamada de *Manifold*.

Existem várias peças que compõem as árvores de natal. Uma delas é o MCV (módulo de conexão vertical), assim chamado devido à forma com que é acoplado à árvore, pois é acoplado verticalmente à estrutura da mesma.

Os MCVs são fabricados atualmente, em sua quase totalidade, de maneira rudimentar, sem a presença de avanços na área da automação da soldagem. São peças consideravelmente grandes, que demandam de vários cordões de solda para a união de seus componentes e que atualmente estão fortemente dependentes da experiência dos soldadores envolvidos nos serviços, já que são fabricados por soldagem manual.

Dessa maneira, é com o intuito de reduzir a dependência dos soldadores, aumentar a produtividade e reduzir a quantidade de retrabalhos necessários após a soldagem, além de contribuir para um ambiente menos insalubre para os trabalhadores envolvidos, que este trabalho propõe o desenvolvimento de um aparato mecânico, juntamente ao levantamento de um procedimento de soldagem automatizado, para a união de peças componentes dos MCVs de extração de petróleo submarino.

Foram confeccionados trilhos para a movimentação do manipulador robótico. Dois conjuntos de fonte de soldagem e manipulador foram utilizados para a soldagem simultânea da junta que possui “chanfro duplo V”. Realizaram-se testes experimentais com alguns processos até a escolha dos melhores para o desenvolvimento de procedimento de soldagem de passe de raiz e

enchimento. Um procedimento de soldagem foi gerado. O mesmo passou por ensaios não destrutivos e não evidenciou defeitos, sendo considerado apto para o uso.

**Palavras chave:** 1. MIG/MAG Pulsado Adaptativo, 2. Soldagem Mecanizada, 3. Petróleo e gás, 4. MCV, 5. Automação.

## ABSTRACT

The petroleum extraction, although of advances in development of non-fossil fuels, is still an important element to contemporary society. It remains the most important raw material for the obtainment of fuels currently used in motor vehicles, industry, aviation, etc. The most used fuel in automobiles in Brazil is the diesel [17], which comes from the petroleum distillation.

The majority of the extracted oil in Brazil is from subsea wells [16]. A part is taken in the pre-salt. For the extraction a whole apparatus is necessary, which includes vessels, platforms, pipelines, etc.

One of the necessary elements for the extraction of oil in oceans is the Christmas tree. It is the component that is attached to the oil wellhead in the submarine ground. The Tree has the task of take the oil from the wells and send it to the central pump based on the ocean ground, called Manifold.

The Christmas trees have a lot of parts in its structure. One of them is the VCM (vertical connection module), called like this because of the way that it is attached to the Tree. It is attached vertically to the tree structure.

The VCM is fabricated nowadays by a rudimentary work, without advances in welding automation. They are large parts that require multiple weld beads to the union of its components. Their fabrication are extremely dependent of the welders experience involved in the manual welding.

Therefore, in order to reduce the dependence of the welders, to increase productivity, reduce the rework required after welding and contribute to a better environment for employees involved, this work proposes the development of a mechanical apparatus and an automated welding procedure for joining component parts of the VCM.

Rails were fabricated for the robotic manipulator movement. Two welding sources and robots were used for the simultaneous welding of the joint (double V-bevel). Some processes were tested to find the best ones. The best ones were used for the welding root and filling passes. A welding procedure has been generated. Non-destructive tests were made and showed no defects, being considered appropriate for use.

**Keywords:** 1. Petroleum, 2. Automated Welding, 3. Pre-Salt, 4. VCM, 5. Automation.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1- Componentes do MCV. A) Tubo e B) Barbatana
- Figura 2 - Trilho de movimentação do sistema de deslocamento automatizado fixado ao gabarito de posicionamento das peças
- Figura 3 - Componentes do processo de soldagem MIG/MAG
- Figura 4 - Detalhes de uma tocha de soldagem MIG/MAG
- Figura 5. Transferência Metálica no RMD
- Figura 6. Bancada de ensaios experimentais
- Figura 7 - MCV para o pré-sal
- Figura 8 - Seção transversal da junta a ser soldada entre tubo e barbatana do MCV
- Figura 9 - Corpos de prova pequenos utilizados no levantamento de parâmetros
- Figura 10 - Fonte Miller PipePro 450 RFC
- Figura 11 - Fonte de soldagem IMC Digiplus A7
- Figura 12 - Sistema de aquisição portátil de parâmetros de soldagem.
- Figura 13 - Manipulador Tartlope V2F
- Figura 14 - Corpos de prova enviados pela empresa ao LABSOLDA
- Figura 15 - Resultado do corpo de prova efetuado com MIG/MAG convencional na posição horizontal
- Figura 16 - Angulação da superfície dos cordões causada pelo escorrimento na posição de soldagem horizontal
- Figura 17 - Radiografias do corpo de prova soldado com o processo MIG/MAG convencional posição horizontal
- Figura 18 - Macrografias do corpo de prova soldado com o processo MIG/MAG convencional na posição horizontal
- Figura 19 - Aspecto visual do corpo de prova soldado com RMD na posição horizontal
- Figura 20 - Radiografias do corpo de prova soldado com o processo RMD na posição horizontal
- Figura 21 - Macrografias do corpo de prova soldado com o processo RMD na posição horizontal
- Figura 22 - Resultado do ensaio efetuado com o processo FCAW na posição de soldagem horizontal
- Figura 23 - Radiografias do corpo de prova soldado com o processo FCAW

Figura 24 - Macrografias do corpo de prova soldado com o processo FCAW

Figura 25 - Resultado dos testes efetuados com MIG/MAG Pulsado na posição horizontal

Figura 26 - Macrografia dos cordões realizados com MIG/MAG Pulsado na posição horizontal

Figura 27 - Aspecto superficial dos cordões soldados com MIG/MAG Pulsado na posição inclinada 45° descendente

Figura 28 - Macrografia dos cordões realizados na posição inclinada 45° descendente

Figura 29 - Radiografia dos cordões realizados na posição inclinada 45° descendente

Figura 30 - Aspecto superficial dos cordões realizados na posição vertical descendente

Figura 31 - Novo posicionamento da peça cogitado para a eliminação da posição vertical descendente

Figura 32 - Aspecto visual dos cordões efetuados na posição inclinada 45° ascendente

Figura 33 - Aspecto superficial dos cordões soldados na posição horizontal

Figura 34 - Aspecto visual dos cordões soldados na posição inclinada 45° ascendente

Figura 35 - Aspecto visual dos cordões soldados na posição inclinada 45° descendente

Figura 36 - Aspecto superficial dos cordões soldados na posição vertical descendente

Figura 37 - Passe de raiz soldado na peça com curvatura enviada pela empresa

Figura 38 - Ensaio de líquido penetrante realizado no verso da raiz

Figura 39 - Passes de enchimento soldados na peça com curvatura enviada pela empresa

Figura 40 - Passe de raiz soldado com o processo MIG/MAG convencional

Figura 31 - Passe de enchimento soldado com o processo MIG/MAG pulsado adaptativo – IMC

Figura 42 - Macrografias de corpos de prova soldados com o gap utilizado atualmente

Figura 43 - Macrografia do teste para eliminação da falta de penetração na raiz

Figura 44 - Identificação dos lados da peça MCV

Figura 45 - Oscilogramas de tensão e corrente para os passes de enchimento

Figura 46 - Ensaio de líquido penetrante na raiz

Figura 47 - Oscilogramas de tensão e corrente para o primeiro passe de solda do lado 2

Figura 48 - Oscilogramas de tensão e corrente para o passe de solda nº11 no lado 2

Figura 49 - Aspecto superficial dos depósitos de enchimento na soldagem do MCV nas instalações da empresa

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de soldagem regulados para o processo MIG/MAG convencional

Tabela 2 - Parâmetros de deslocamento para soldagem com o processo MIG/MAG convencional

Tabela 3 - Parâmetros de soldagem para o processo RMD

Tabela 4 - Parâmetros de soldagem para o processo FCAW

Tabela 5 - Parâmetros de deslocamento para soldagem com o processo FCAW

Tabela 6 - Parâmetros de soldagem e movimentação regulados para a posição horizontal

Tabela 7 - Parâmetros de soldagem e movimentação regulados para a posição inclinada 45° ascendente

Tabela 8 - Parâmetros de soldagem e movimentação regulados para a posição inclinada 45° ascendente

Tabela 9 - Parâmetros de soldagem utilizados no passe de raiz

Tabela 10 - Parâmetros de soldagem utilizados nos passes de enchimento

Tabela 11 - Parâmetros de soldagem utilizados na nova solução para o passe de raiz

Tabela 12 - Parâmetros de soldagem regulados para o passe de raiz

Tabela 13 - Parâmetros de soldagem de referência utilizados nos passes de enchimento

Tabela 14 - Valores médios e eficazes para os passes de enchimento

Tabela 15 - Parâmetros de soldagem regulados para o primeiro passe no lado 2

Tabela 16 - Valores médios e eficazes para o Passe 1 Lado 2

Tabela 17 - Parâmetros de soldagem de referência utilizados nos passes de enchimento do MCV

Tabela 18 - Valores médios e eficazes para o Passe 11 do enchimento no Lado 2

## LISTA DE SÍMBOLOS

DBCP	Distância entre bico de contato e peça
MCV	Módulo de conexão vertical
FCAW	<i>Flux cored arc welding</i>
MIG/MAG	<i>Metal inert/active gas</i>
GMAW	<i>Gas metal arc welding</i>
RMD	<i>Regulated metal deposition</i>
EPS	Especificações do procedimento de soldagem
Um	Tensão média
Im	Corrente média
U-rms	Tensão eficaz
I-rms	Corrente eficaz
GAP	Distância entre peças
CP	Corpo de prova
Ks	Indutância de subida
Kd	Indutância de descida
Va	Velocidade de alimentação de arame
a	Ajuste da altura do arco

## Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	Objetivos.....	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1	Processo MIG/MAG.....	20
2.1.1	Princípios de funcionamento .....	20
2.1.2	Tochas.....	21
2.1.3	Gases de proteção.....	22
2.1.4	Variantes do processo .....	23
2.1.4.1	MIG/MAG convencional ou GMAW .....	23
2.1.4.2	FCAW ( <i>Fluxed Cored Arc Welding</i> ).....	24
2.1.4.3	RMD ( <i>Regulated Metal Deposition</i> ).....	24
2.1.4.4	MIG/MAG Pulsado Adaptativo .....	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	25
3.1	Bancada de ensaios.....	26
3.2	MCV para o pré-sal.....	26
3.3	Geometria da junta a ser soldada .....	27
3.4	Corpos de prova pequenos .....	28
3.5	Corpos de prova enviados pela empresa .....	29
3.6	Fontes de soldagem .....	29
3.7	SAP.....	30
3.8	Gases de proteção.....	31
3.9	Material consumível .....	31
3.10	Sistema de movimentação automatizada da tocha .....	32
4	DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES E RESULTADOS.....	33
4.1	Testes iniciais em corpos de prova pequenos .....	35
4.1.1	MIG/MAG Convencional - Miller .....	36
4.1.2	RMD – Miller .....	40
4.1.3	FCAW - Miller.....	42
4.2	Determinação de procedimentos com o MIG/MAG Pulsado .....	45
4.2.1	Posição horizontal .....	45
4.2.2	Posição inclinada 45° descendente.....	46
4.2.3	Posição vertical descendente .....	48
4.2.4	Posição inclinada 45° ascendente.....	49
4.3	Soldagem em peça retilínea enviada pela empresa (1) .....	51
4.3.1	Posição horizontal .....	51
4.3.2	Posição inclinada 45° ascendente.....	51
4.3.3	Posição inclinada 45° descendente.....	52

4.3.4 Posição vertical descendente .....	54
4.4 Soldagem na peça com curvatura enviada pela empresa .....	55
4.5 Soldagem na peça retilínea enviada pela empresa (2) .....	57
4.6 Tentativa de eliminação da falta de penetração no passe de raiz .....	58
4.7 Soldagem do MCV na empresa .....	60
4.7.1 Soldagem do lado 1 - frontal .....	61
4.7.2 Soldagem no lado 2 - posterior (raiz) .....	63
4.7.3 Fatos ocorridos e hipóteses levantadas .....	67
4.7.3.1 Soldagem de raiz - o que fazer para obter uma raiz adequada .....	67
4.7.3.2 Instabilidades do arco e problemas com cabos .....	67
4.7.3.3 Falha do tartilope .....	68
4.7.3.4 Porosidades no último cordão .....	69
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	69
6 CONCLUSÕES .....	70
8 REFERENCIAS .....	72

## 1 INTRODUÇÃO

Inserido no modo de vida contemporâneo, apesar de cada dia mais se buscar combustíveis menos poluentes, o petróleo ainda é um elemento extremamente importante. Provém dele a gasolina, utilizada em automóveis, o diesel utilizado nos caminhões, base do transporte nacional, além de vários outros elementos importantes para a indústria e para a sociedade.

O petróleo, gerado a partir de compostos de carbono antigos que sofreram processo de catagênese (PIMENTEL, 2010), pode ser extraído em dois tipos de locais: em terra ou no mar. O procedimento da extração em solo é considerado mais simples por não ser necessária a utilização de embarcações, dentre outros fatores. Já a extração em oceanos é considerada de alta complexidade.

Para a extração do petróleo em ambiente marítimo há a necessidade da utilização de um sistema chamado de Árvore de Natal Molhada. Este tipo de sistema é um módulo de extração do petróleo submarino. São acoplados à boca das tubulações imergidas no poço de petróleo. As Árvores de Natal têm por função retirar o petróleo do poço e enviá-lo até o Manifold, que por sua vez bombeia o petróleo extraído para a plataforma localizada na superfície do mar.

Em um projeto de extração, são instaladas várias Árvores. Elas enviam, por intermédio de tubulações, o petróleo para o Manifold, que por sua vez bombeia o petróleo até a plataforma. O Manifold é a central de bombeamento do petróleo retirado dos poços submarinos e enviado até a superfície.

O MCV (Módulo de Conexão Vertical) é um dos componentes das árvores de Natal. Ele tem por função conectar a Árvore e às linhas de tubulação que vão até o Manifold. Ele é assim chamado, pois é acoplado verticalmente à Árvore após a instalação da mesma à base do poço. Ele necessita ser acoplado posteriormente à instalação da Árvore, pois somente após isso é possível realizar a ligação da Árvore ao Manifold. Esta operação é realizada com todos os componentes já instalados no solo submarino com o uso de guindastes nas embarcações e de robôs controlados remotamente por técnicos na superfície.

O MCV é composto de: um tubo com curvatura superior a 90° revestido internamente para evitar a corrosão causada pelos elementos presentes no petróleo; da barbatana, chapa soldada externamente ao tubo; possui também um olhal utilizado para a fixação aos guindastes para içamento, além de outros componentes como flanges para fixação à tubulação e elementos de sacrifício para evitar a corrosão do material da peça no ambiente marítimo.

O tubo e a barbatana são unidos entre si por intermédio de soldagem. Este procedimento é atualmente realizado manualmente pelo processo FCAW manual, no qual a soldagem simultânea

dos dois lados da junta é realizada objetivando-se reduzir a tendência de empenamento causado pela soldagem e também para reduzir o tempo de execução. Sendo assim, o presente trabalho busca a automatização da soldagem de união entre tubo e barbatana, componentes do MCV das Árvores de Natal.

A peça é fixada em um gabarito de montagem que por sua vez é posicionado em uma viga metálica vertical. Essa disposição é justificada pela necessidade que a peça impõe quanto à execução simultânea da soldagem pelos dois lados. Essa estratégia é necessária para evitar problemas de empenamento causados pela soldagem. Somente dessa forma dois soldadores podem executar o serviço simultaneamente. A posição em que a peça é fixada é a principal fonte de dificuldade para a realização da soldagem mecanizada. Devido à curvatura da peça, a soldagem entre o tubo e a barbatana precisa ser realizada em diferentes posições, passando da posição horizontal para uma região inclinada e chegando à posição vertical.

Quando realiza a soldagem de forma manual, o soldador constantemente compensa as variações de geometria da peça e, principalmente, as diferenças no comportamento da poça de fusão em função da posição de soldagem, atuando na movimentação da tocha e na sua velocidade de progressão. No caso de uma aplicação mecanizada, o procedimento determinado deve absorver ao máximo essas variações, minimizando a influência do operador no resultado dos cordões de solda.

## **1.1 Objetivos**

O trabalho em questão é fruto de uma parceria entre LABSOLDA - UFSC e uma empresa fabricante de equipamentos para o setor de petróleo e gás. O objetivo do trabalho é a mecanização da soldagem de união da barbatana (Figura 1A) e do tubo (Figura 1B), peças componentes do MCV (módulo de conexão vertical), um dos subsistemas das árvores de natal (módulos de extração de petróleo).



Figura 1. Componentes do MCV. A) Barbatana e B) Tubo

As atividades consistem no desenvolvimento de todo aparato necessário para a instalação do manipulador de solda ao gabarito de montagem das peças (tubo e barbatana) para a soldagem, além do desenvolvimento de um procedimento de soldagem robusto que suporte as variações existentes e aquelas que ocorrerem durante a soldagem da junta, como por exemplo, a alternância da posição de soldagem, espaçamentos não uniformes entre os cordões que podem gerar regiões com falta de fusão, pré-aquecimento da peça e escorrimento dos cordões gerados.

O equipamento precisa descrever um movimento paralelo à junta a ser soldada. A Figura 2 demonstra o trilho de deslocamento do sistema automatizado sendo posicionado no gabarito de fixação das peças.



Figura 2. Trilho de movimentação do sistema de deslocamento automatizado fixado ao gabarito de posicionamento das peças

E inicialmente almejava-se apenas a definição de um procedimento de soldagem para os passes de enchimento. Contudo, no andamento das atividades o passe de raiz também foi estudado.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Processo MIG/MAG**

#### **2.1.1 Princípios de funcionamento**

O processo MIG/MAG (*Metal Inert/Active Gas*), também conhecido como GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) é um processo de soldagem que utiliza o aquecimento gerado por um arco voltaico controlado, estabelecido entre um arame eletrodo e uma peça para a fusão de ambos. O arame eletrodo é comercializado em bobinas e adicionado durante o processo, juntamente com o gás de proteção para geração de uma atmosfera protetora com o objetivo de evitar a oxidação do material fundido.

É constituído basicamente por:

- Uma fonte de soldagem, juntamente com um cabeçote alimentador de arame;
- Cilindro de gás de proteção;
- Bobina de arame, material de adição do processo;
- Tocha de soldagem;
- Cabos de corrente e mangueiras de gás para ligação dos circuitos elétricos e de gás, respectivamente.

Tais elementos podem ser verificados na Figura .

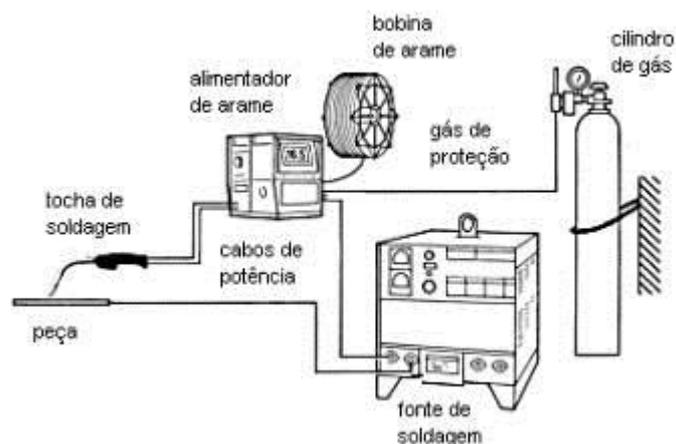


Figura 3. Componentes do processo de soldagem MIG/MAG [5]

O processo pode ser controlado basicamente de duas maneiras. Em modo tensão e modo corrente. No modo tensão são configurados os parâmetros de velocidade de arame e tensão e a corrente oscila proporcionalmente. Já em modo corrente, são configurados os parâmetros de velocidade de arame e corrente e a tensão oscila conforme o processo. No modo convencional, o processo é utilizado em modo tensão.

A corrente é o parâmetro mais atuante com relação à transferência de calor no arco e por consequência da fusão do material de adição (arame eletrodo) e de base (peça). Alterando-se o nível da corrente empregada no processo, altera-se o modo de transferência do arame para a peça. Com correntes baixas, o modo de transferência é o curto-circuito, onde acontecem sucessivos toques do arame na peça, oscilando períodos de arco (arco voltaico “aceso”) e curto (sem arco voltaico).

Elevando-se o nível da corrente acontece um modo de transferência em uma faixa muito instável e evitada para soldagem, chamada de transferência globular. E por fim em níveis extremamente altos ocorre a transferência por voo livre, também chamada de transferência por spray. Nessa faixa o nível de corrente é tão elevado que ocorre o lançamento do material do arame antes do toque com a peça.

### 2.1.2 Tochas

As tochas de soldagem empregadas na soldagem MIG/MAG são constituídas de algumas peças, conforme se pode verificar na Figura 4.

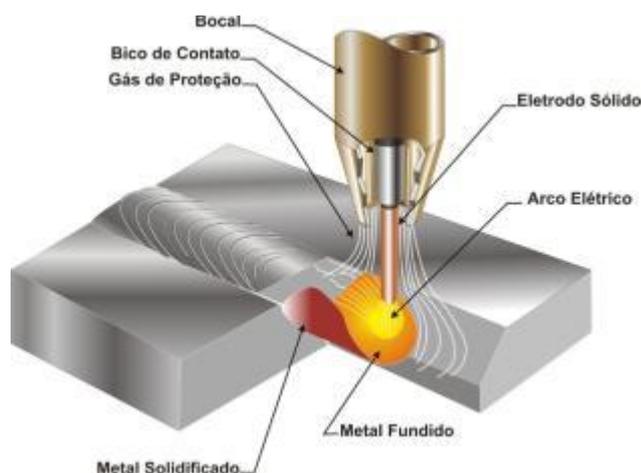


Figura 4. Detalhes de uma tocha de soldagem MIG/MAG [15]

As peças principais componentes de uma tocha de soldagem são:

- Bico de contato - responsável pelo contato elétrico para a passagem da corrente do circuito da fonte de soldagem para o arame eletrodo;
- Difusor de gás - serve para o lançamento do gás ao arco e sua difusão uniforme;
- Bocal - que constringe e protege a atmosfera gasosa.

Além dos itens citados anteriormente, as tochas de soldagem detêm cabos para a passagem da corrente elétrica, mangueiras para passagem de água de arrefecimento e gás de proteção e conexões.

### 2.1.3 Gases de proteção

Os gases de proteção utilizados são gases largamente empregados na indústria. Possuem comprovada eficiência para a finalidade utilizada, que neste caso é a geração de uma atmosfera protetora para o arco voltaico e a região compreendida pela poça de fusão durante a soldagem.

Foram utilizadas misturas comerciais de argônio e gás carbônico.

- Ar + 25% CO<sub>2</sub>;
- Ar + 15% CO<sub>2</sub>.

Tais gases foram utilizados nas variantes do processo MIG/MAG que serão descritas a seguir neste trabalho.

## 2.1.4 Variantes do processo

O processo MIG/MAG possui algumas variantes com determinadas características. Cada variante é geralmente utilizada para aplicações específicas nas quais suas características suprem satisfatoriamente as necessidades. As variantes deste processo que foram utilizadas no trabalho são descritas a seguir.

### 2.1.4.1 MIG/MAG convencional ou GMAW

O processo MIG/MAG convencional [5, 7] ou GMAW é considerado o mais simples. É basicamente a concepção original do processo. Ele se adapta naturalmente a quaisquer alterações ou variações ocorridas durante a soldagem. Não há controle eletrônico imposto ao processo.

O gás de proteção geralmente utilizado neste caso é uma mistura de argônio e  $\text{CO}_2$ .

Alterando-se o nível de corrente empregado, ocorre alteração da forma com que ocorre a transferência metálica. Valores baixos de corrente e tensão causam a transferência metálica por curto-circuito. Este modo de transferência é caracterizado pelo contato cíclico entre o arame e a peça. A cada toque é destacado um pequeno pedaço do arame. O arco voltaico é constantemente extinguido e reaberto devido aos curtos ocorridos e estes fatos geram instabilidades como, por exemplo, geração de respingos. É utilizado geralmente para soldagem de chapas finas, soldagem fora de posição e de passe de raiz.

Aumentando o nível da corrente empregada, chega-se a uma faixa transitória chamada transferência globular. Este modo de transferência é geralmente evitado, devido à grande instabilidade da transferência. Acontecem eventos aleatórios de transferências por curto-circuito e por voo livre e as gotas geradas são geralmente de diâmetros maior do que o arame.

Quando são utilizados níveis elevados de corrente, chega-se a transferência por voo livre denominada “*spray*”. É assim chamada, pois as gotas são destacadas do arame de maneira similar a um jato *spray*.

### 2.1.4.2 FCAW (*Fluxed Cored Arc Welding*)

O processo FCAW [2,3] é basicamente igual ao MIG/MAG convencional, com a diferença do uso de arames tubulares. Este tipo de arame é composto por uma camada exterior de metal, e uma camada interna composta por fluxo. Este fluxo pode ser composto por elementos de proteção, elementos de liga ou até mesmo pó metálico.

A presença do fluxo altera as características da transferência metálica. É um arame considerado mais fácil de utilizar por soldadores.

### 2.1.4.3 RMD (*Regulated Metal Deposition*)

O RMD é um variante do MIG/MAG desenvolvido pela empresa Miller, que funciona no controle dos curtos-circuitos ocorridos na soldagem. Seu princípio de funcionamento é muito similar ao descrito por (SILVA, 2005). Há um controle na corrente de soldagem para a redução da geração de respingos e também para o destacamento suave de gotas na transferência metálica por curto-circuito.

Os estágios do curto-circuito podem ser verificados na Figura 5, que demonstra as fases da transferência metálica ocorridas no RMD.

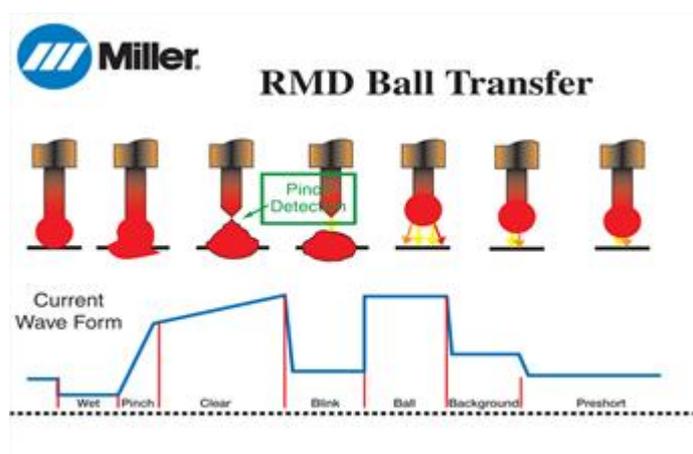


Figura 5. Transferência metálica no RMD [12].

Inicialmente o arame aproxima-se e encosta na peça. A fonte detecta o curto e rapidamente abaixa o valor da corrente para evitar a geração de respingos ou a repulsão da gota de maneira precoce. Posteriormente eleva-se a corrente até que ocorra o chamado efeito *Pinch*, que nada mais é do que a

estricção da ponte metálica (metal líquido unindo o arame e a peça) causada pela elevação da força eletromagnética gerada pela elevação da corrente.

Antes de ocorrer o destacamento, a fonte, pela leitura da tensão, antecede o evento e abaixa a corrente a um valor no qual não haverá geração demasiada de respingos.

Ao destacar, eleva-se novamente a corrente para a fusão de uma nova quantidade de material do arame e reduz-se a corrente até a ocorrência de um novo curto.

#### **2.1.4.4 MIG/MAG Pulsado Adaptativo**

O MIG/MAG pulsado é uma variante criada com o objetivo de trazer os benefícios da utilização de um arco voltaico estável e constante durante a soldagem, diferentemente do caso do curto-circuito, onde o arco “apaga e acende” ao longo do tempo causando instabilidades como geração de respingos, por exemplo. O MIG/MAG pulsado utiliza níveis de corrente menores do que na transferência por spray em soldagem convencional, porém maiores do que na transferência por curto-circuito. Cordões efetuados com este processo possuem melhor molhabilidade e menor tendência de penetração, quando comparados a cordões soldados com MIG/MAG convencional. Há a imposição da corrente de soldagem com a oscilação entre níveis maiores e menores da mesma (pulsos e bases, respectivamente). O objetivo da pulsação neste caso é o destacamento de um pedaço do arame (desprendimento de uma gota). Há geralmente um destacamento de gota para cada pulso da corrente.

Além da pulsação da corrente, há um controle relacionado à manutenção da altura do arco, ou seja, que garante que a altura do arco se mantenha constante mesmo se houver variação da altura entre bico de contato e peça. Este controle é chamado de adaptativo. A fonte verifica a leitura de tensão constantemente e de acordo com o valor lido, realiza alteração na corrente do processo.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Para viabilizar os trabalhos de levantamento de parâmetros e demais ensaios, alguns elementos precisaram ser utilizados e estudados. Estes elementos serão descritos a seguir:

### 3.1 Bancada de ensaios

A bancada de ensaios era composta de uma série de componentes. Era reestruturada de acordo com os corpos de prova a serem soldados. A Figura 6 demonstra a bancada na qual podem ser verificados o manipulador robótico para o deslocamento da tocha (A), a IHM (*interface* homem máquina) do manipulador (B), o gabinete de controle eletrônico do manipulador (C), o trilho de fixação e deslocamento do manipulador (D), a fonte de soldagem (E), a tocha de soldagem (F) e o corpo de prova linear utilizado para testes experimentais (G).

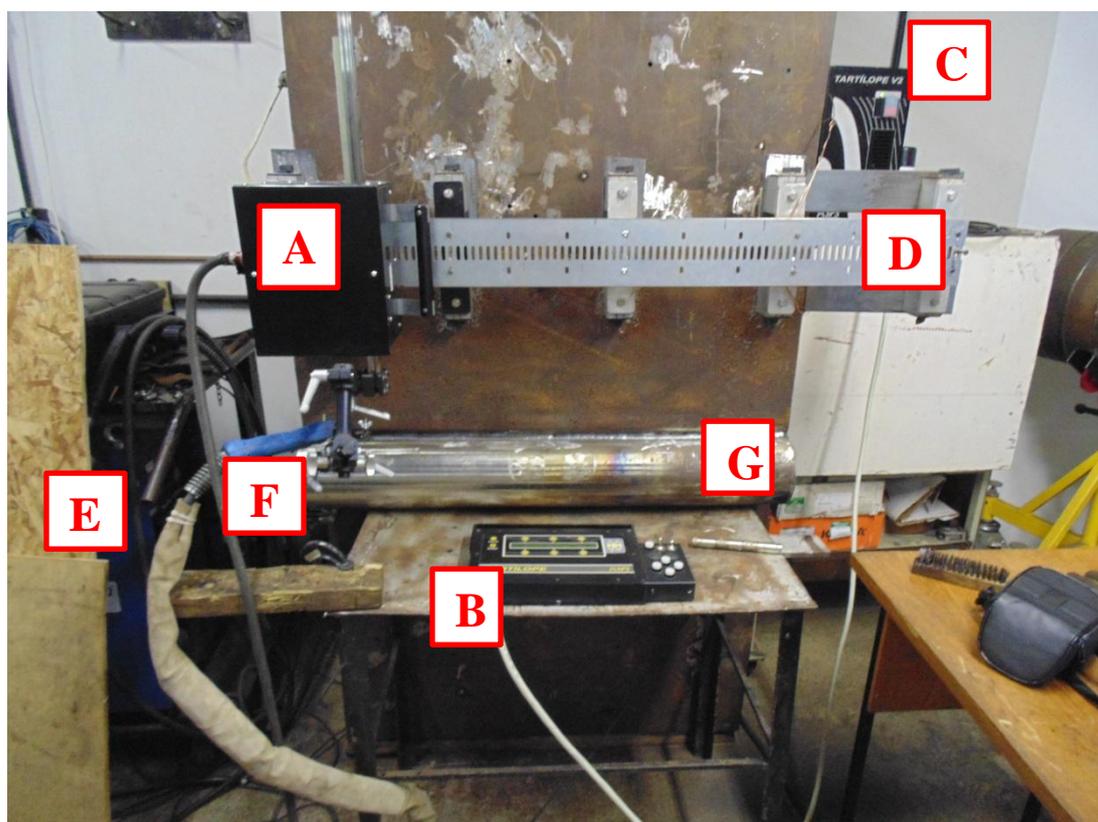


Figura 6. Bancada de ensaios experimentais

### 3.2 MCV para o pré-sal

O MCV para o pré-sal é um dos componentes da árvore de natal para a extração de petróleo em grandes profundidades. Um exemplo dessa peça pode ser verificado na Figura 7.



Figura 7. MCV para o pré-sal

Este elemento é fabricado em várias etapas e a soldagem entre a chapa superior e o tubo, objetivo deste trabalho, é uma delas. Consiste na união de um tubo previamente revestido internamente e conformado a uma chapa (também chamada de barbatana) de 3 polegadas (76,2 mm) de espessura.

### **3.3 Geometria da junta a ser soldada**

A junta a ser soldada consiste na junção de um tubo curvado a uma chapa. Devido à forma das peças e a maneira na qual são fixadas haverá inevitavelmente variação da posição de soldagem. Contudo a geometria da junta é basicamente a mesma ao longo de toda a extensão. Ela pode ser verificada na Figura 8.

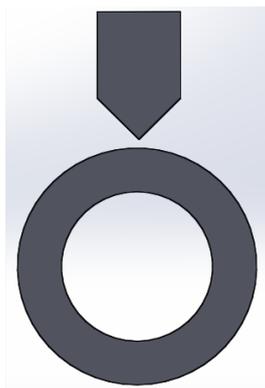


Figura 8. Seção transversal da junta a ser soldada entre tubo e barbatana do MCV

O tubo possui diâmetro interno de 6 polegadas (152 mm) e externo de 8 polegadas (203 mm) aproximadamente. A chapa possui espessura de 3 polegadas (76 mm) e a junta possui comprimento de 1,5 metros. A distância entre a chapa e o tubo ao longo da junta utilizada atualmente para a soldagem manual com FCAW é de 6 a 8 milímetros.

### 3.4 Corpos de prova pequenos

Os corpos de prova pequenos consistiam de uma simulação grosseira das peças a serem soldadas com o objetivo de simplificar os testes iniciais e também reduzir o custo, pois as peças oficiais são de elevado valor. Eles eram constituídos de um pedaço de tubo cortado e ponteadado junto a uma barra perfil “L” ou cantoneira, conforme demonstrado a seguir na Figura 9.



Figura 9. Corpos de prova pequenos utilizados no levantamento de parâmetros

Estes elementos foram de grande valia no início das atividades do trabalho, pois evitaram o gasto desnecessário de peças enviadas pela empresa para o levantamento inicial de parâmetros.

### 3.5 Corpos de prova enviados pela empresa

A empresa disponibilizou dois conjuntos de peças para o levantamento de parâmetros e a preparação de um procedimento de soldagem automatizado para o MCV. Foram disponibilizados dois tubos (um tubo reto e um curvado) e duas chapas, conforme demonstrado na Figura 14.

Tais peças foram soldadas após um levantamento prévio de parâmetros, que será descrito mais detalhadamente à frente neste trabalho. Estas peças serviram para a validação do procedimento de soldagem definido para a soldagem do MCV.

### 3.6 Fontes de soldagem

As fontes de soldagem utilizadas no desenvolvimento do trabalho foram basicamente duas. Nas etapas iniciais, por ser uma fonte disponível e largamente utilizada na empresa, foi utilizada a fonte Miller PipePro 450 RFC, demonstrada na Figura 10.



Figura 10. Fonte Miller PipePro 450 RFC [12]

Posteriormente, devido a problemas existentes na fonte Miller, que serão descritos a seguir, optou-se pela troca do equipamento pela fonte IMC Digiplus A7, demonstrada na Figura 11.



Figura 11. Fonte de soldagem IMC Digiplus A7 [11]

### 3.7 SAP

O sistema de aquisição portátil de parâmetros de soldagem (SAP) é uma ferramenta muito útil para a verificação da qualidade do processo de soldagem empregado nas mais variadas aplicações. Durante a soldagem, o sistema faz a aquisição dos valores instantâneos de corrente, tensão, velocidade de arame e vazão de gás. Serve também como método de verificação da qualidade da fonte de soldagem, para analisar diferenças entre os parâmetros ajustados e efetuados. O equipamento pode ser verificado na Figura 12.



Figura 12. Sistema de aquisição portátil de parâmetros de soldagem [10]

### 3.8 Gases de proteção

Os gases de proteção empregados nos ensaios experimentais foram dois:

- A mistura Ar + 25% CO<sub>2</sub> nos ensaios com MIG/MAG convencional, FCAW e RMD;
- A mistura Ar + 15% CO<sub>2</sub> nos ensaios com MIG/MAG pulsado.

O uso de dois gases tornou-se necessário, pois o processo MIG/MAG pulsado necessita de uma mistura com menor teor de gás carbônico se comparado às variantes do processo MIG/MAG onde a transferência metálica ocorre por curtos-circuitos. Isto reduz a tendência de geração de curtos-circuitos, fato evitado na soldagem com MIG/MAG pulsado.

### 3.9 Material consumível

Como materiais de adição, foram utilizados dois tipos de arames, os quais foram disponibilizados inicialmente pela empresa. Foram eles:

- Arame ER80S-D2 de 1,2 mm de diâmetro, utilizado na soldagem com os processos MIG/MAG convencional, pulsado e RMD;
- Arame E71T-1 de 1,2 mm de diâmetro, utilizado para a soldagem com FCAW.

Estes dois materiais foram utilizados por serem consumíveis já empregados na soldagem das peças na empresa. Os mesmos já passaram por avaliação prévia pela equipe da empresa e foram considerados aptos a serem utilizados para a soldagem do MCV.

### 3.10 Sistema de movimentação automatizada da tocha

O sistema de movimentação da tocha utilizado foi o Tartilope V2F. Ele pode ser verificado na Figura 13.



Figura 13. Manipulador Tartilope V2F [9]

Este equipamento foi especialmente projetado para a automatização da soldagem de cordões de grande comprimento. Geralmente é empregado em soldagens lineares, mas pode também ser empregado em juntas com curvatura, desde que o trilho no qual o equipamento desloca seja fabricado com curvatura semelhante à da junta, mantendo-se sempre a uma distância similar à mesma.

Seu uso para a união entre o tubo e a barbatana do MCV foi indicado por ser uma solução satisfatória a um valor muito menor se comparado a um robô antropomórfico, por exemplo. Dois trilhos de deslocamento com curvatura semelhante à junta foram fabricados, já que a soldagem da peça é realizada simultaneamente pelos dois lados da junta. Um deles pode ser verificado na Figura 2. Trilho de movimentação do sistema de deslocamento automatizado fixado ao gabarito de posicionamento das peças

#### 4 DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES E RESULTADOS

O trabalho realizado no LABSOLDA em parceria com uma empresa do setor de petróleo e gás evoluiu em duas linhas principais. Foram elas: o projeto dos trilhos de movimentação do Tartilope V2F e o desenvolvimento do procedimento de soldagem, ambos desenvolvidos paralelamente no decorrer do projeto. Este trabalho tem como foco principal o levantamento do procedimento de soldagem.

Inicialmente, é importante comentar a utilização do Tartilope V2F para o citado projeto. Este equipamento, devido às características de geometria da junta e posições de soldagem, se demonstrou o mais adequado dentre os manipuladores de deslocamento de tocha fabricados pelo LABSOLDA. Ele já foi utilizado com sucesso em outras aplicações similares, onde trilhos com curvatura foram utilizados e funcionaram satisfatoriamente.

O projeto mecânico referente ao trabalho baseou-se na fabricação dos suportes e trilhos com curvatura, enquanto o aluno trabalhou no desenvolvimento de procedimento de soldagem.

A empresa forneceu ao LABSOLDA dois corpos de prova (conjuntos tubo - barbatana), menores que a peça oficial a ser soldada (MCV para pré-sal). As peças enviadas compuseram os corpos de prova demonstrados na Figura 14: um conjunto linear (A) e outro com curvatura (B).





O MIG/MAG pulsado demonstrou ser o melhor para os passes de enchimento (inicialmente o passe de raiz não era de interesse). Então foi utilizado na soldagem de todas as posições necessárias:

- Posição horizontal;
- Posição inclinada 45° descendente;
- Posição vertical descendente;
- Posição inclinada 45° ascendente.

Finalizada esta etapa, foi possível soldar o corpo de prova retilíneo enviado pela empresa em diferentes posições:

- Posição horizontal;
- Posição inclinada 45° ascendente;
- Posição inclinada 45° descendente;
- Posição vertical descendente.

Finalizada a soldagem na peça retilínea, iniciou-se a soldagem na peça com curvatura enviada pela empresa.

- Soldagem na peça com curvatura enviada pela empresa.

Contudo, houve problemas de falta de fusão entre cordões e a peça retilínea foi novamente preparada e soldada:

- Soldagem na peça retilínea enviada pela empresa (2);
- Tentativa de eliminação da falta de penetração no passe de raiz.

Posteriormente a equipe do LABSOLDA foi até a empresa soldar o MCV de pré-sal:

- Soldagem do MCV na empresa;
  - Soldagem do lado 1 – frontal;
  - Soldagem no lado 2 - posterior (raiz).

As etapas listadas acima serão explanadas detalhadamente a seguir.

#### **4.1 Testes iniciais em corpos de prova pequenos**

Uma das principais dificuldades relacionadas com o desenvolvimento do procedimento para a soldagem mecanizada do MCV é a alteração da posição de soldagem devido à curvatura da junta e a posição em que a peça é fixada.

Para iniciar os trabalhos, optou-se por realizar os testes com os corpos de prova na posição horizontal, por ser esta, a posição mais difícil em função da tendência de escorrimento da poça sobre a peça ou sobre o cordão anterior, que provoca uma assimetria demasiada, assim como investigado por (SOUZA, 2011).

Os trabalhos iniciais tentaram buscar um procedimento com o maior nível de corrente de soldagem e alimentação de arame possível sem que se tivesse o escorrimento excessivo da poça, o que comprometeria a qualidade da solda.

Com o uso da fonte de soldagem Miller, foram realizados ensaios com arame tubular e maciço, com os modos: MIG/MAG convencional, FCAW, RMD e MIG/MAG pulsado. Para todos os ensaios a vazão de gás de proteção utilizada foi de 15 L/min. Os testes com MIG/MAG pulsado foram feitos com uma mistura de Ar + 15% CO<sub>2</sub> e os demais foram efetuados com uma mistura de Ar + 25% CO<sub>2</sub>.

#### 4.1.1 MIG/MAG Convencional - Miller

Os parâmetros levantados para a soldagem com MIG/MAG convencional dos corpos de prova pequenos foram os demonstrados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de soldagem regulados para o processo MIG/MAG convencional

Va - Velocidade de alimentação de arame (m/min)	3,0
U - Tensão (V)	18
Indutância (adimensional)	98

Paralelamente, para a soldagem mecanizada, são necessários os parâmetros de deslocamento da tocha de soldagem. Nos passes de enchimento iniciais (do 1° ao 4°), por ser esta a região mais estreita do chanfro, foi possível realizar um passe de solda por camada. Para isso utilizou-se um movimento de oscilação da tocha (tecimento) com amplitude que abrangesse a largura total da junta na respectiva camada. A partir do quinto passe, como a abertura do chanfro se torna maior, não foi possível realizar um único passe por camada. Sendo efetuados dois ou mais passes por camada com os parâmetros de movimentação dos passes 5 e 6. Os parâmetros de deslocamento utilizados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de deslocamento para soldagem com o processo MIG/MAG convencional

Passe	1	2	3	4	5	6
Velocidade de soldagem (cm/min)	16	13	7	7	10	12
Amplitude (mm)	2	7	11	12	12	10
Frequência (Hz)	2	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7
Tempos de parada (s)	0	0	0	0	0	0

O resultado obtido pode ser verificado na Figura 15.



Figura 15. Resultado do corpo de prova efetuado com MIG/MAG convencional na posição horizontal

Durante a soldagem dos cordões para o preenchimento da junta foram verificados alguns fatos relevantes para a continuidade das atividades:

- Correntes maiores do que 130 amperes geram cordões com escorrimento demasiado e por consequência de má qualidade;
- O escorrimento demasiado prejudica a fusão do metal de base, principalmente na região inferior do cordão, podendo causar problemas de falta de fusão entre passes;
- A realização da soldagem na posição horizontal faz com que a superfície dos cordões de solda fique inclinada em relação à vertical, fato que pode ser verificado na Figura 16;

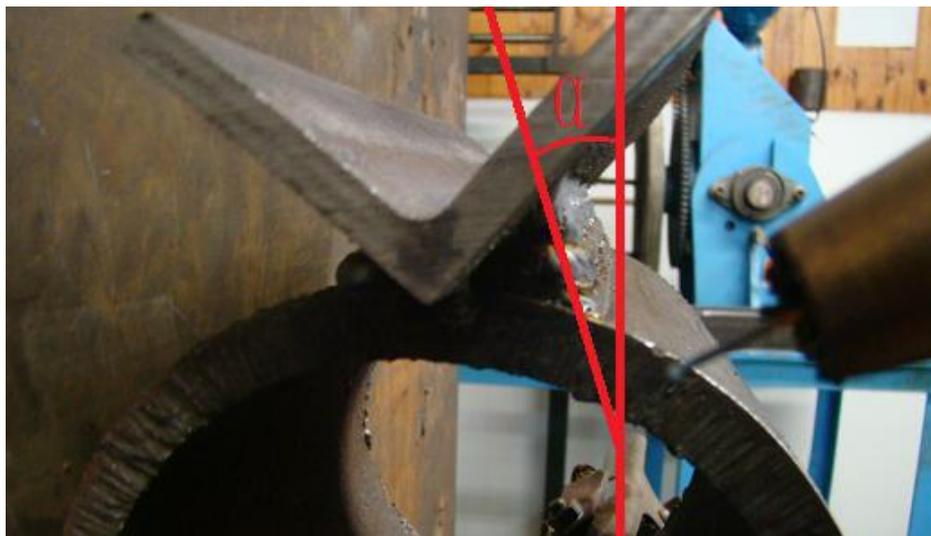


Figura 16. Angulação da superfície dos cordões causada pelo escorrimento na posição de soldagem horizontal

- A utilização de amplitudes de tecimento muito elevadas prejudica a estabilidade do arco, pois ao realizar o tecimento ao longo do eixo “Y” do Tartilope V2F (sentido transversal à junta) ocorre uma variação muito grande da distância entre bico de contato e peça (DBCP). Essa variação provoca mudanças bruscas no comprimento do arco, com a ocorrência de “explosões” abruptas do arco voltaico;
- A tendência de escorrimento dos cordões causada pela posição horizontal faz com que o último passe feito para o fechamento da camada, que é realizado na região superior da junta, possua a tendência de causar mordeduras entre o cordão e a chapa superior.

Posteriormente, para a verificação da qualidade da junta com a sobreposição dos passes e camadas, foi realizada análise radiográfica. As radiografias serviram para a localização de possíveis defeitos os quais foram verificados detalhadamente com a preparação de macrografias. Duas radiografias da junta foram efetuadas com configurações diferentes de ganho da máquina do ensaio.

O resultado pode ser verificado na Figura 17.

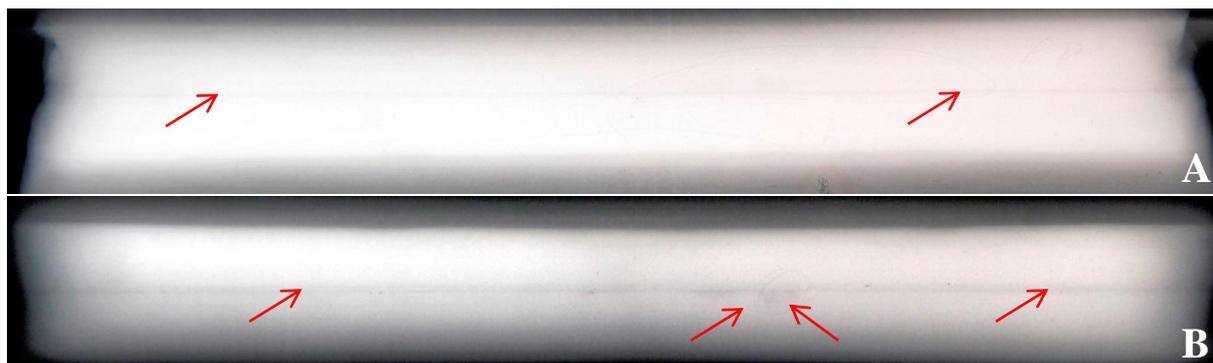


Figura 17. Radiografias do corpo de prova soldado com o processo MIG/MAG convencional posição horizontal

Na radiografia “A” é possível ver uma linha que percorre toda a extensão do corpo de prova. A mesma linha é verificada na radiografia “B”. Esta linha corresponde à falta de penetração na raiz, fato esperado em todos os corpos de prova dos três processos, pois o levantamento do passe de raiz, por ser de maior complexidade, foi realizado posteriormente, após a definição do procedimento para os passes de enchimento.

Na radiografia “B” pode ser verificada também a presença de uma descontinuidade, causada provavelmente devido a uma “explosão abrupta” do arco, mencionada anteriormente.

Após a análise das radiografias, o corpo de prova foi cortado transversalmente aos cordões para a confecção de macrografias, com o objetivo de verificar a qualidade interna. Elas podem ser verificadas na Figura 18.

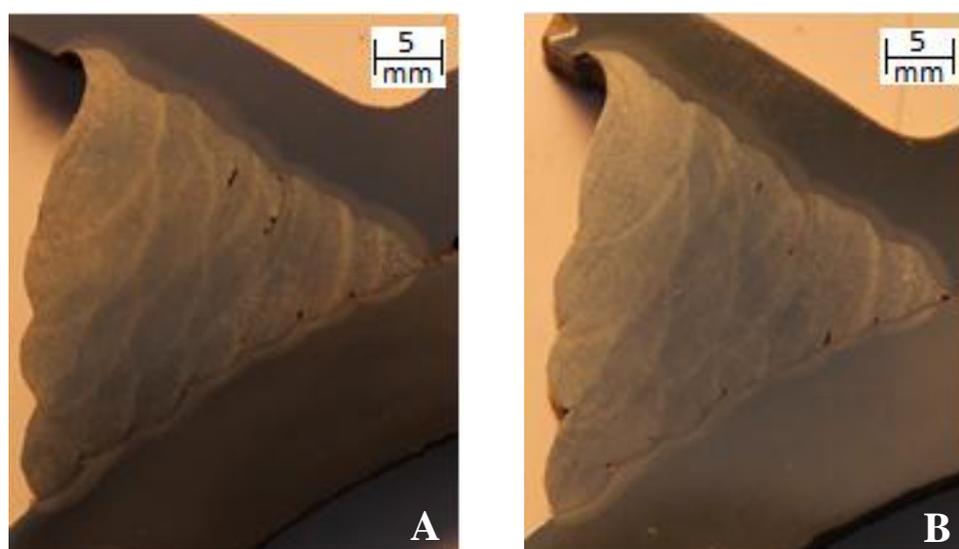


Figura 18. Macrografias do corpo de prova soldado com o processo MIG/MAG convencional na posição horizontal

Analisando-se as macrografias é possível verificar falta de penetração na raiz (o que já era esperado), diversos pontos com falta de fusão entre passes e também mordeduras na região superior entre a chapa (região superior) e os cordões.

#### 4.1.2 RMD – Miller

Para os testes com o processo RMD foram utilizados os parâmetros da Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros de soldagem para o processo RMD

Va - Velocidade de alimentação de arame (m/min)	3,8
<i>Arc Control</i> (adimensional)	25
<i>Arc Adjust</i> (adimensional)	50

Os parâmetros “*arc control*” e “*arc adjust*”, segundo o manual da fonte [12], correspondem à largura e ao comprimento do arco voltaico, respectivamente. Contudo, em análises realizadas com o auxílio do SAP, foi possível verificar que ambos realizam alteração na tensão do processo.

Os parâmetros de deslocamento do Tartilope V2F foram similares aos realizados com MIG/MAG convencional, com um pequeno incremento na velocidade de soldagem e também na frequência de tecimento, devido ao uso de alimentação de arame mais elevada. O resultado pode ser verificado na Figura 19.



Figura 19. Aspecto visual do corpo de prova soldado com RMD na posição horizontal

Posteriormente o corpo de prova foi sujeito a ensaio radiográfico para a verificação de descontinuidades internas. As radiografias podem ser verificadas na Figura 20.

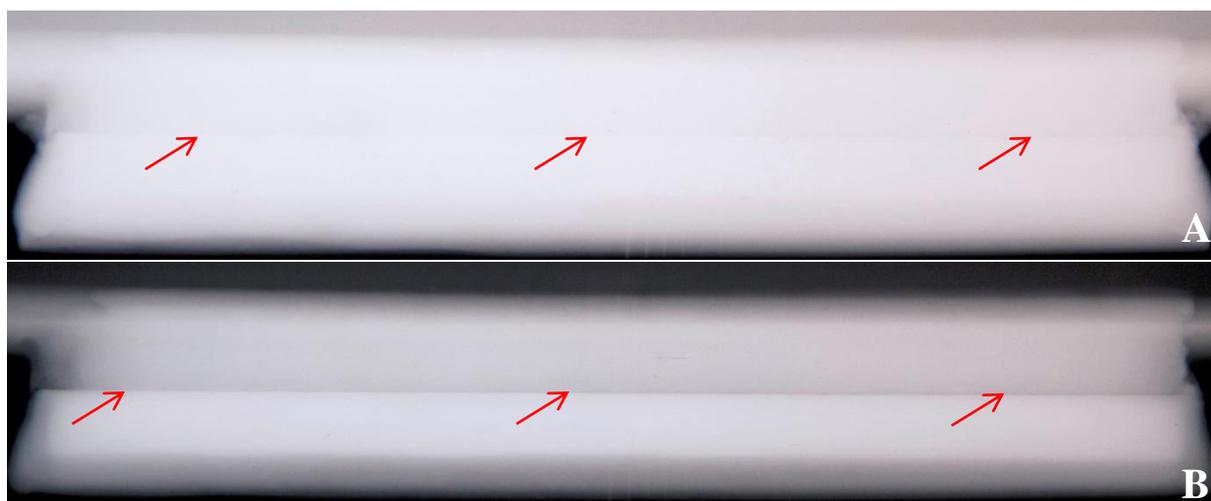


Figura 20. Radiografias do corpo de prova soldado com o processo RMD na posição horizontal

Nas radiografias da Figura 20 podem ser verificadas linhas ao longo da extensão do corpo de prova que, como comentado anteriormente neste relatório, demonstram falta de penetração na raiz. Nenhum outro tipo de defeito foi verificado.

Após o ensaio radiográfico o corpo de prova foi cortado transversalmente para a confecção de macrografias. O resultado pode ser visto na Figura 21.

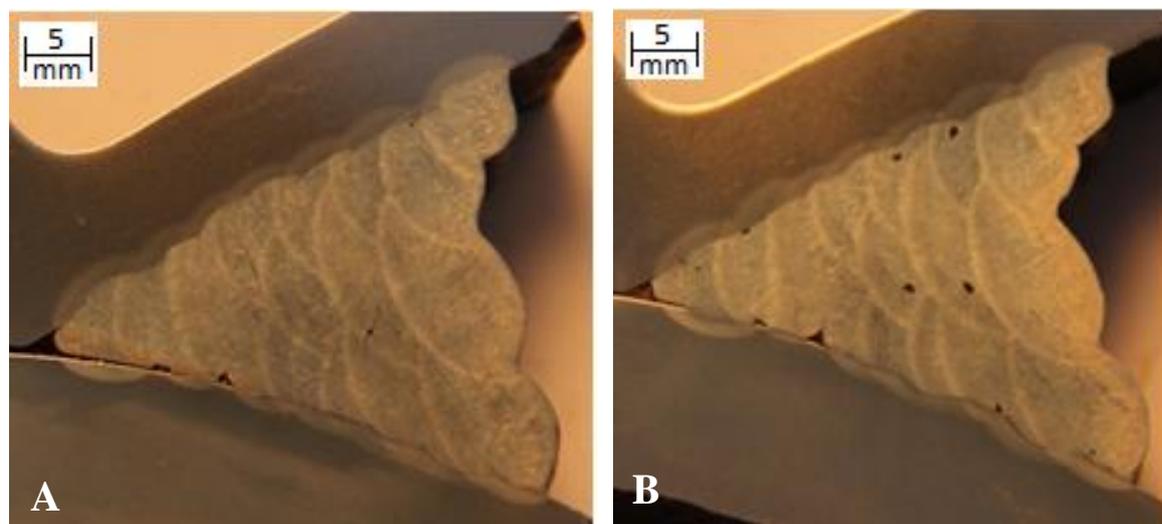


Figura 21. Macrografias do corpo de prova soldado com o processo RMD na posição horizontal

Nas macrografias é possível verificar defeitos de falta de penetração na raiz, poros, falta de fusão entre passes e também falta de fusão entre o tubo (região inferior) e os cordões de solda.

### 4.1.3 FCAW - Miller

Para os testes de soldagem com o processo FCAW foram utilizados os parâmetros da Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros de soldagem para o processo FCAW

Va – Velocidade de alimentação de arame (m/min)	5,1
Tensão (V)	24,5
Indutância (adimensional)	30

A soldagem da junta foi efetuada realizando tecimento com amplitude abrangendo a largura total da junta até o terceiro passe. A partir do quarto passe, a abertura do chanfro exigiu a utilização de mais cordões por camada (cordões “filetados”). Todos os parâmetros estão listados na Tabela 5.

Para os cordões realizados a partir do quarto passe foram utilizados os parâmetros dos passes 2 e 3 da Tabela 5. A diferença principal foi basicamente a amplitude de tecimento que era alterada em função da geometria da junta no momento da soldagem de cada passe.

Tabela 5. Parâmetros de deslocamento para soldagem com o processo FCAW

Passe	1	2	3
Velocidade de soldagem (m/min)	18	11	13
Amplitude (mm)	2	10	6
Frequência (Hz)	3	0,7	0,8
Tempos de parada (s)	0	0	0

O resultado da soldagem com o processo FCAW é apresentado na Figura 22.



Figura 22. Resultado do ensaio efetuado com o processo FCAW na posição de soldagem horizontal

Posteriormente, o corpo de prova foi sujeito a ensaios radiográficos para a verificação de defeitos internos. As radiografias podem ser verificadas na Figura 23.

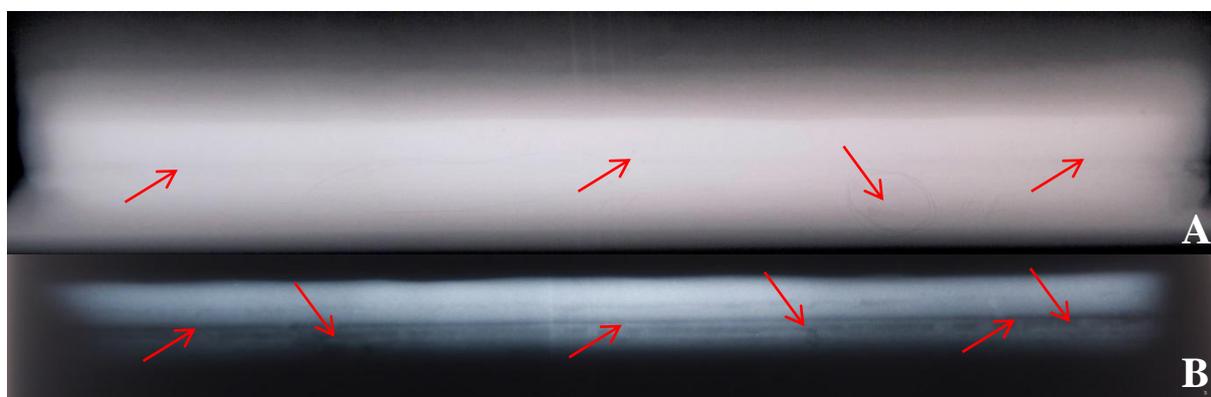


Figura 23. Radiografias do corpo de prova soldado com o processo FCAW

Nas radiografias feitas no corpo de prova do processo FCAW foi possível verificar diversos pontos indicadores de defeitos. Na Figura 23A, que apresenta com maior evidência a região mais superficial dos cordões, é possível verificar apenas a linha causada pela falta de penetração na raiz e uma pequena descontinuidade. Já na Figura 23B é possível verificar uma série de defeitos, causados provavelmente por inclusões de escória entre os cordões.

Com o resultado das radiografias em mãos, o corpo de prova foi cortado em sua seção transversal onde foram verificados os defeitos e foram realizadas macrografias para a análise da qualidade interna dos cordões nessas regiões. Os resultados são apresentados na Figura 24.

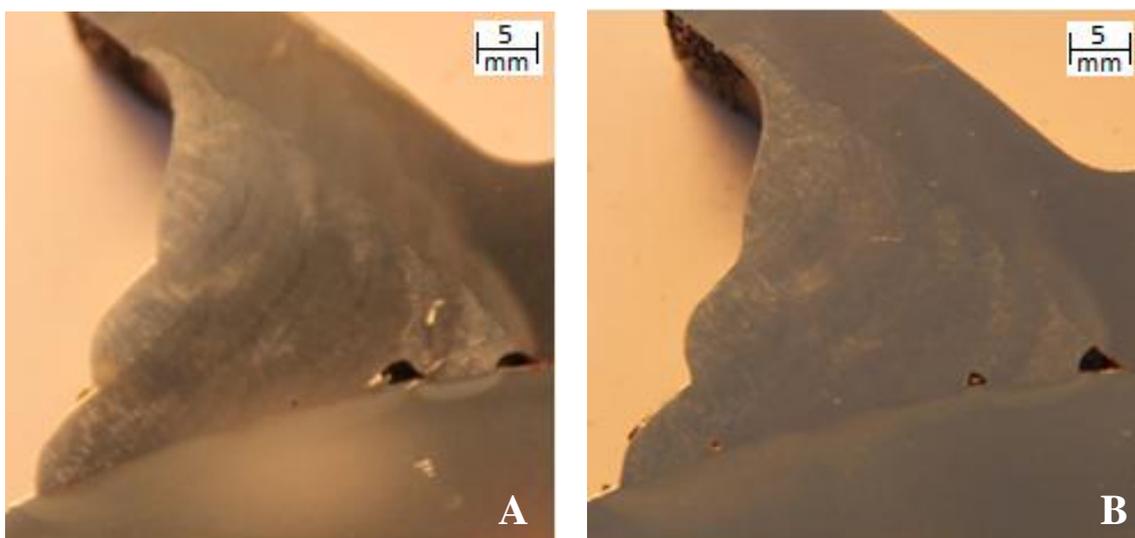


Figura 24. Macrografias do corpo de prova soldado com o processo FCAW

Nas macrografias pode-se verificar falta de fusão na região da raiz além de faltas de fusão na região inferior entre os passes de solda e o tubo. Foi constatado que a falta de fusão entre passes é causada por inclusões de escória provindas do fluxo do arame tubular.

Todos os processos testados geraram cordões de convexidade elevada que causam tendência de geração de faltas de fusão entre passes. Contudo, dentre os três processos testados, o que demonstrou os melhores resultados para os passes de enchimento foi o processo com arame tubular (FCAW). Estes resultados iniciais foram demonstrados à empresa na forma de relatório e também em visita técnica ao LABSOLDA realizada pelo engenheiro da empresa responsável, onde o mesmo ressaltou a importância em se buscar um procedimento com o arame maciço ER80S-D2 (ao invés do tubular E71T-1) devido a dois fatores principais:

- O alto valor comercial do arame tubular em comparação com o arame maciço;
- Em soldagens realizadas pela empresa com arame tubular, grande parte dos defeitos na produção era devido à inclusão de escória entre passes.

Com isso, o foco foi dirigido para a obtenção de um procedimento com o uso do arame maciço ER80S-D2. Como o procedimento com MIG/MAG convencional deu um resultado que apresentou pontos de falta de fusão, optou-se por realizar os testes com a versão MIG/MAG Pulsado, que na fonte da Miller é chamado de *ProPulse*. Foram soldados corpos de prova pequenos, similares aos testes anteriores. Os resultados preliminares obtidos com essa versão foram considerados melhores do que com as versões MIG/MAG convencional, RMD e FCAW.

## 4.2 Determinação de procedimentos com o MIG/MAG Pulsado

Com a definição da versão do processo de soldagem que seria utilizada para os passes de enchimento, iniciaram-se os testes para o levantamento de parâmetros de soldagem em diferentes posições, com o objetivo de representar melhor as variações de posição que acontecem na peça real.

Foram testadas as posições horizontal, vertical, inclinada 45° ascendente e inclinada 45° descendente. As duas últimas foram testadas para verificar qual a melhor maneira de realizar a soldagem da junta, subindo ou descendo. A estratégia adotada foi obter um único conjunto de parâmetros que possibilitasse a soldagem nas diferentes posições, sem a necessidade de intervenção por parte do operador. Os trabalhos iniciaram na posição horizontal.

### 4.2.1 Posição horizontal

Os testes experimentais na posição horizontal geraram os resultados demonstrados na Figura 25.

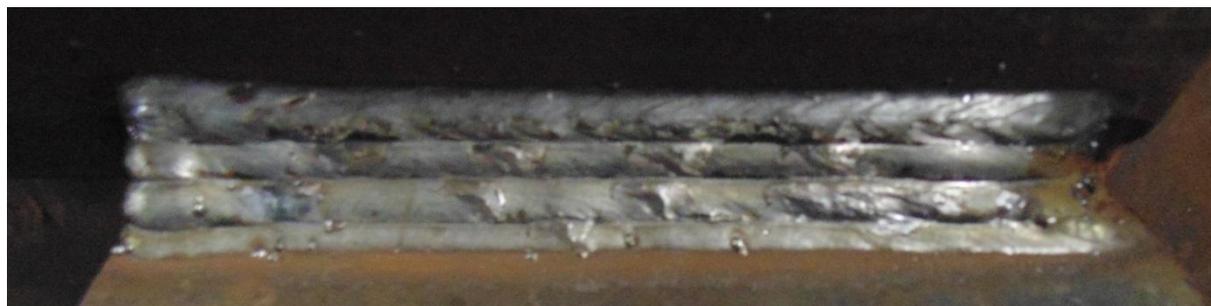


Figura 25. Resultado dos testes efetuados com MIG/MAG Pulsado na posição horizontal

Os parâmetros utilizados estão demonstrados na Tabela 6.

Tabela 6. Parâmetros de soldagem e movimentação regulados para a posição horizontal

Alimentação de arame (m/min)	6,4
<i>Arc Adjust</i>	56
<i>Arc Control</i>	25
Velocidade de soldagem (cm/min)	35
Amplitude de tecimento (mm)	2
Frequência de tecimento (Hz)	2,5

Tempos de parada (s)	0
----------------------	---

Posteriormente foram realizadas macrografias no corpo de prova para a verificação da qualidade interna dos cordões. Isto pode ser verificado na Figura 26.

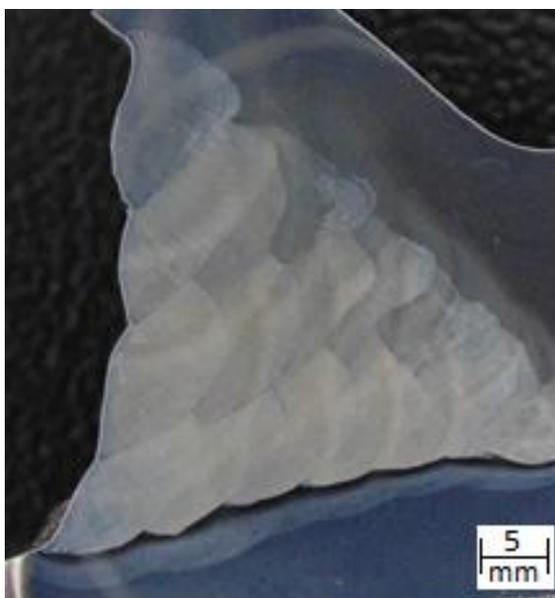


Figura 26. Macrografia dos cordões realizados com MIG/MAG Pulsado na posição horizontal

É possível verificar na macrografia da Figura 26 que nenhum defeito de falta de fusão ou de qualquer outro tipo é evidenciado. O resultado obtido nestes testes foi satisfatório e os parâmetros de soldagem utilizados foram repetidos nos testes da posição inclinada 45° descendente.

#### 4.2.2 Posição inclinada 45° descendente

Para esta posição o resultado do aspecto superficial dos cordões pode ser verificado na Figura 27. Estes cordões foram soldados com os mesmos parâmetros da Tabela 6.



Figura 27. Aspecto superficial dos cordões soldados com MIG/MAG Pulsado na posição inclinada 45° descendente

É possível verificar uma leve tendência de escorrimento nos cordões soldados, fato este que pode causar falta de fusão entre passes. Como pode ser verificado na Figura 28, que demonstra a macrografia dos cordões da Figura 27, alguns defeitos de falta de fusão entre os cordões ocorreram. Fato que pode ser solucionado com um posicionamento mais cuidadoso da tocha na soldagem entre passes e também com a redução do material depositado e da energia gerada pelo arco.

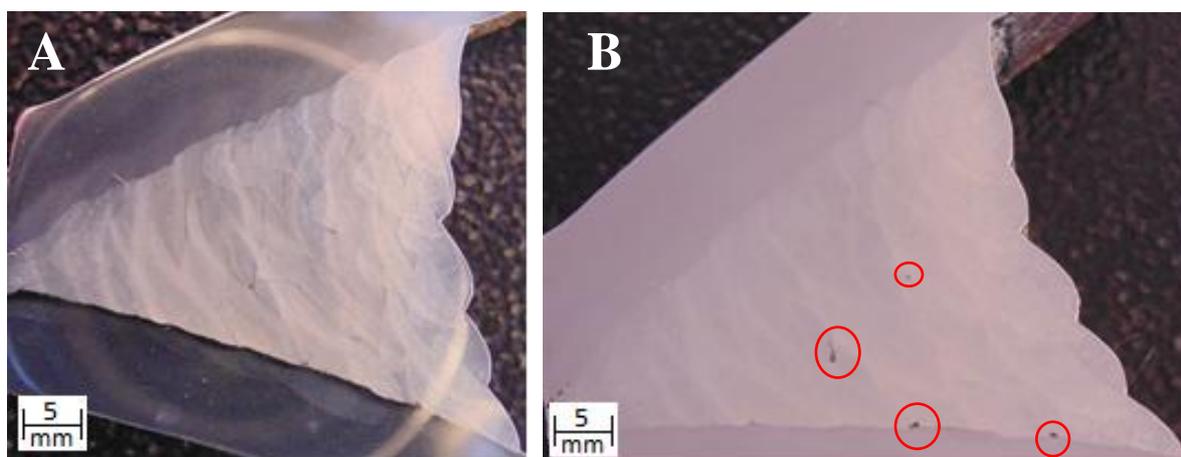


Figura 28. Macrografia dos cordões realizados na posição inclinada 45° descendente

As Figura 28 A e B representam a mesma macrografia, apenas com ângulos de visualização diferentes. Na Figura 28A é possível verificar com detalhes todos os cordões realizados e na Figura 28B é possível visualizar mais claramente os defeitos existentes entre os cordões realizados. Adicionalmente para os cordões demonstrados na Figura 27, foi realizado ensaio radiográfico para a verificação da qualidade interna dos cordões, conforme pode ser verificado na Figura 29. Na radiografia podem ser vistas linhas paralelas longas que demonstram, possivelmente, as faltas de fusão entre passes já demonstradas na macrografia da Figura 28.

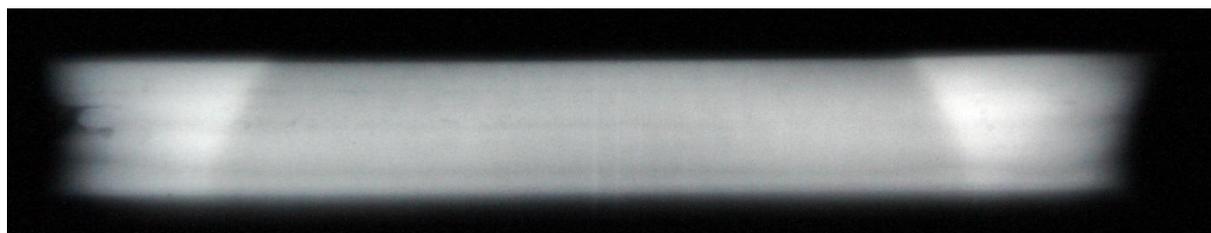


Figura 29. Radiografia dos cordões realizados na posição inclinada 45° descendente

### 4.2.3 Posição vertical descendente

Os testes de soldagem na posição vertical descendente, realizados com os parâmetros descritos na

Tabela 6, geraram os cordões demonstrados na Figura 30.



Figura 30. Aspecto superficial dos cordões realizados na posição vertical descendente

É possível verificar uma geometria totalmente diferente das obtidas nos resultados anteriores (posição horizontal - Figura 25 e posição inclinada 45° descendente - Figura 27). Este resultado conduziu à conclusão de que seria inviável a soldagem do MCV na posição em que ela se encontrava atualmente, fixada ao gabarito da empresa (Figura 2) com o nível de corrente empregado até então. Esta diferença de geometria causaria a necessidade de correções demasiadas na trajetória da tocha de soldagem. Os cordões iniciados entre passes na posição horizontal e mantidos dessa maneira na posição inclinada 45° descendente, deveriam ser deslocados para o centro dos cordões já soldados na transição para a posição vertical descendente. Haveria dessa

maneira uma grande tendência de geração de defeitos entre cordões, devido à necessidade de correções de posicionamento demasiadas da tocha de soldagem.

Sendo assim, após discussão da questão levantada com a equipe do LABSOLDA e o engenheiro da empresa, foi cogitada a eliminação da posição vertical descendente, com a alteração da posição da peça no gabarito. O seu posicionamento seria então o demonstrado na Figura 31. Dessa maneira, a posição vertical descendente seria eliminada e uma nova posição faria parte do mesmo. Esta posição seria a inclinada  $45^\circ$  ascendente.



Figura 31. Novo posicionamento da peça cogitado para a eliminação da posição vertical descendente

Esta nova posição foi então ensaiada.

#### 4.2.4 Posição inclinada $45^\circ$ ascendente

A soldagem na posição inclinada  $45^\circ$  ascendente mantendo os mesmos parâmetros utilizados nos testes anteriores (posições horizontal e inclinada  $45^\circ$  descendente) também não foi possível. Os cordões sofreram escorrimento demasiado, inviabilizando completamente a possibilidade do uso dos parâmetros da Tabela 6.

Para viabilizar a soldagem foi necessária a redução no nível de energia aplicada à peça e para isso a velocidade de alimentação de arame foi reduzida de 6,4 m/min para 4,0 m/min (Tabela 7). Somente com a redução da velocidade de alimentação de arame que foi possível realizar a soldagem de maneira satisfatória.

Tabela 7. Parâmetros de soldagem e movimentação regulados para a posição inclinada 45° ascendente

Alimentação de arame (m/min)	4,0
<i>Arc Adjust</i>	56
<i>Arc Control</i>	25
Velocidade de soldagem (cm/min)	30
Amplitude de tecimento (mm)	2
Frequência de tecimento (Hz)	2,5
Tempos de parada (s)	0

O aspecto visual dos cordões pode ser verificado na Figura 32.



Figura 32. Aspecto visual dos cordões efetuados na posição inclinada 45° ascendente

Apesar de a soldagem ter sido possível, é visível a má qualidade do depósito, principalmente do cordão superior, onde ainda ocorreram algumas instabilidades no arco voltaico. Contudo, os demais cordões não tiveram resultado tão ruim e isto não inviabilizou o andamento das atividades.

Para manter a estratégia de se obter um mesmo parâmetro de soldagem para todas as posições da peça, houve a necessidade de se refazer os ensaios nas posições horizontal e inclinada 45° descendente para ajustar o valor da alimentação de arame ao valor utilizado na posição inclinada 45° ascendente. Se isto não fosse feito, o volume de material adicionado em cada passe para cada posição de soldagem seria muito diferente, o que dificultaria a operação e controle do procedimento e prejudicaria a qualidade final da junta soldada.

Ainda como medida tomada para acelerar os testes experimentais, foi definida que a análise da qualidade interna dos cordões, por intermédio de ensaios radiográficos e de macrografias seria

realizada apenas quando se obtivessem resultados satisfatórios nas peças enviadas pela empresa ao LABSOLDA.

### 4.3 Soldagem em peça retilínea enviada pela empresa (1)

Após a soldagem de todas as posições em corpos de prova pequenos, foi possível realizar um levantamento prévio de parâmetros. Estes parâmetros foram utilizados na soldagem da peça retilínea enviada ao LABSOLDA pela empresa.

#### 4.3.1 Posição horizontal

O aspecto superficial dos cordões soldados na posição horizontal da peça retilínea enviada pela empresa ao LABSOLDA pode ser verificado na Figura 33. Os parâmetros utilizados para a soldagem dos cordões demonstrados na Figura 33 foram os mesmos utilizados nos testes em corpos de prova pequenos para a posição inclinada 45° ascendente (Tabela 7).



Figura 33. Aspecto superficial dos cordões soldados na posição horizontal

#### 4.3.2 Posição inclinada 45° ascendente

Para este caso os parâmetros anteriormente utilizados nos corpos de prova menores não foram eficientes. Os parâmetros “*arc adjust*” e “*arc control*” precisaram ser alterados para os valores demonstrados na Tabela 8.

Tabela 8. Parâmetros de soldagem e movimentação regulados para a posição inclinada 45° ascendente

Alimentação de arame (m/min)	4,0
<b><i>Arc Adjust</i></b>	<b>50</b>
<b><i>Arc Control</i></b>	<b>30</b>
Velocidade de soldagem (cm/min)	30
Amplitude de tecimento (mm)	2
Frequência de tecimento (Hz)	2,5
Tempos de parada (s)	0

O resultado pode ser verificado na Figura 34.



Figura 34. Aspecto visual dos cordões soldados na posição inclinada 45° ascendente

O aspecto superficial dos cordões ficou satisfatório. Em comparação com as posições horizontal e inclinada 45° descendente há uma pequena diferença de geometria, contudo não haveria problemas com a qualidade dos cordões.

#### 4.3.3 Posição inclinada 45° descendente

O aspecto superficial dos cordões soldados na posição inclinada 45° descendente, na peça retilínea enviada pela empresa ao LABSOLDA, pode ser verificado na Figura 35.



Figura 35. Aspecto visual dos cordões soldados na posição inclinada 45° descendente

A qualidade superficial dos cordões ficou muito boa. Os parâmetros utilizados para a soldagem dos cordões demonstrados na Figura 35 foram os mesmos utilizados nos testes em corpos de prova pequenos (Tabela 7).

Contudo, da maneira em que se encontrava a solução para a soldagem do MCV, ela seria realizada com a peça fixada de acordo com a posição da Figura 31. A soldagem iniciaria na posição inclinada 45° ascendente, percorrendo a horizontal e finalizando na posição inclinada 45° descendente. Essa estratégia implicaria na alteração do modo de fixação atual das peças e do gabarito atualmente utilizado. Além disso, mesmo sendo uma pequena intervenção, na transição entre as posições inclinada ascendente e horizontal foi necessária a alteração dos parâmetros “*arc adjust*” e “*arc control*”. Isto porque a soldagem na posição inclinada 45° ascendente não foi possível com o conjunto de parâmetros definido nas outras posições. Similarmente, o mesmo ocorreu ao se testar os parâmetros da posição inclinada 45° ascendente nas outras posições, ou seja, o conjunto de parâmetros que gera cordões de qualidade na posição inclinada 45° ascendente não gera cordões de qualidade nas outras duas posições.

Dessa maneira, resgatando resultados anteriores, onde a posição vertical descendente havia sido testada apenas com 6,4 m/min de alimentação de arame, ou seja, antes da redução necessária para a posição inclinada 45° ascendente, discutiu-se a possibilidade de testar novamente a soldagem na posição vertical descendente com o parâmetro de alimentação de arame reduzido. Este fato teoricamente causaria a diminuição da tendência de escorrimento do cordão e também diminuição da geração de concavidade demasiada demonstrada na Figura 30, fatores que fizeram com que essa posição tivesse sido descartada, fato descrito no item 4.2.3 deste trabalho. Com isso, a soldagem na posição vertical descendente foi testada novamente, sendo descrita na sequência.

#### 4.3.4 Posição vertical descendente

Mantendo-se os mesmos parâmetros utilizados na posição horizontal e inclinada 45° descendente (Tabela 7), realizou-se a soldagem na posição vertical descendente. Como resultado, a constatação de que a redução da alimentação de arame trouxe benefício à geometria dos cordões, fato que pode ser verificado na Figura 36.

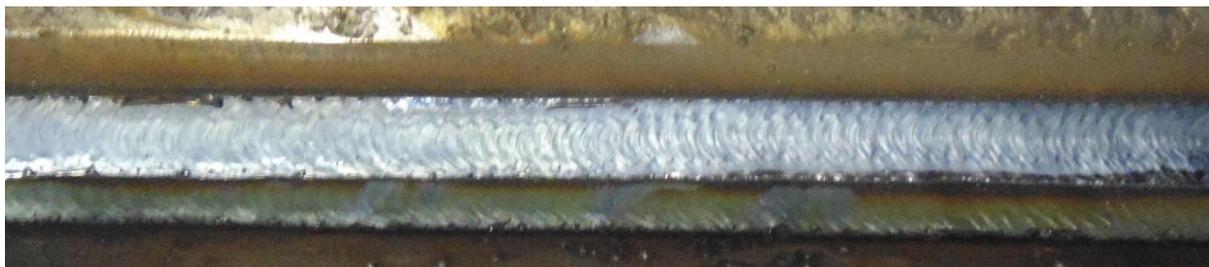


Figura 36. Aspecto superficial dos cordões soldados na posição vertical descendente

O aspecto superficial dos cordões ficou muito melhor, se comparado à Figura 30 (testes com alimentação de arame de 6,4 m/min). Sua qualidade foi satisfatória e similar aos cordões das posições inclinada 45° descendente e horizontal, assim como a geometria dos cordões gerados.

Dessa maneira, com a viabilização da soldagem na posição vertical descendente, as peças e o gabarito da empresa não precisariam mais ser deslocados da sua posição original, mantendo-se como demonstrado na Figura 2. A soldagem é realizada iniciando na posição horizontal, percorrendo a inclinada descendente e finalizando na vertical descendente. Os parâmetros de soldagem são exatamente os mesmos para todas as posições, isentando o operador de quaisquer alterações de valores de parâmetros elétricos da fonte durante a soldagem.

Contudo, foi verificado no andamento das atividades que a abertura do arco no modo ProPulse da fonte Miler PipePro 450 RFC ocorre de maneira instável. A estabilização do processo só acontece após cerca de três segundos de arco aberto, sendo que a qualidade do cordão formado até então fica totalmente comprometida. Este fato se torna crítico principalmente se for considerada a necessidade de iniciar cordões ao longo do comprimento da junta, o que implicaria em um cordão com defeitos nesse trecho. Dessa maneira, após reunião entre a equipe do LABSOLDA e os responsáveis pelo trabalho na empresa, optou-se pelo uso da fonte IMC Digiplus A7 para a continuação do projeto. Como vantagem adicional para o uso da fonte IMC pode-se citar a possibilidade de interação entre o Tartlope V2F e a fonte, como por exemplo, a

sincronização do movimento de tecimento com a alteração de parâmetros de soldagem, caso seja necessário.

Com a substituição da fonte de soldagem foi necessária a adequação dos parâmetros utilizados na fonte Miller para a fonte de soldagem IMC. Para esta adequação utilizou-se o sistema de aquisição de dados portátil (SAP) para a coleta dos parâmetros aplicados pela fonte Miller durante a soldagem e, posteriormente, a repetição em alguns testes em corpos de prova pequenos para sua validação. Com isso, foi gerado um programa sinérgico para o processo MIG/MAG pulsado com o arame ER80S-D2 e gás de proteção Ar + 15% CO<sub>2</sub>. Os parâmetros gerados foram os mesmos utilizados na soldagem desenvolvida pela equipe do LABSOLDA na empresa, a qual será detalhada a seguir.

#### 4.4 Soldagem na peça com curvatura enviada pela empresa

Finalizada a soldagem da peça retilínea, a peça com curvatura similar ao conjunto objeto do projeto de desenvolvimento foi preparada para soldagem.

Baseando-se nos resultados obtidos com a soldagem da peça retilínea o procedimento de soldagem da peça com curvatura sofreu algumas alterações. Inicialmente optou-se por tentar soldar o passe de raiz com um processo MIG/MAG pulsado. A intenção era de se aumentar o nível de energia transferida para a peça, já que nos testes anteriores com o modo convencional houve problemas de falta de fusão e penetração na raiz. Os parâmetros do passe de raiz podem ser verificados na Tabela 9.

Tabela 9. Parâmetros de soldagem utilizados no passe de raiz

Fonte		Tartílope	
Programa	MIG/MAG Pulsado sinérgico adaptativo	Vs (cm/min)	10 (regulado) 5 (real)
Im (A)	130	Tecimento	Trapezoidal
a (V)	19,4	F (Hz)	0,5
Gás	95%Ar+5%CO <sub>2</sub>	A (mm)	5
Vazão de gás (l/min)	15	tp (s)	0,2

O aspecto visual dos cordões gerados pode ser verificado na Figura 37. Como medida para avaliação do resultado da raiz, foi efetuado ensaio de líquido penetrante para a verificação da qualidade do cordão.



Figura 37. Passe de raiz soldado na peça com curvatura enviada pela empresa

Foram verificados problemas de falta de fusão, conforme pode ser visualizado na Figura 38. Os defeitos foram marcados e removidos por meio de esmerilhamento.



Figura 38. Ensaio de líquido penetrante realizado no verso da raiz

Finalizado o passe de raiz e a análise da qualidade do mesmo, os passes de enchimento foram efetuados em ambos os lados da peça.

Naquele momento, o modo de controle de corrente do MIG/MAG pulsado da IMC não estava totalmente acertado para o referido arame. O arco tinha variações bruscas de comprimento com a variação de DBCP resultante da própria geometria da junta. Por esse motivo, e também devido à urgência do andamento das atividades, a soldagem foi conduzida com o MIG/MAG convencional para os passes de enchimento. Para isso, foram utilizados os parâmetros descritos na

Tabela 10.

Tabela 10. Parâmetros de soldagem utilizados nos passes de enchimento

Fonte		Tartilope	
Programa	MIG/MAG convencional	Vs (cm/min)	40 (regulado) 20 (real)
Va (m/min)	3,8	Tecimento	Trapezoidal
U (V)	20	F (Hz)	0,7
Ks e Kd	80	A (mm)	8
Gás	75%Ar+25%CO <sub>2</sub>	tp (s)	0
Vazão de gás (l/min)	15		

A qualidade superficial obtida com a soldagem dos passes de enchimento pode ser verificada na Figura 39. A necessidade de regular a velocidade de soldagem a um valor maior foi devido à curvatura da junta, pois o a junta e o trilho de deslocamento do tartilope possuem raios de curvatura diferentes.



Figura 39. Passes de enchimento soldados na peça com curvatura enviada pela empresa

Na análise dos resultados da soldagem da peça com curvatura via ultrassom, foram verificadas várias discontinuidades. As principais foram faltas de fusão entre os cordões e o tubo.

Com essa constatação, a necessidade do uso da versão MIG/MAG pulsada foi confirmada. Somente com o uso de uma versão do processo que fornecesse uma maior potência de arco seria possível solucionar os problemas de falta de fusão. Neste momento as investigações e desenvolvimentos sobre o MIG/MAG pulsado aplicado na fonte da IMC já estavam em estágio avançado, o que permitiu a retomada dos ensaios com essa versão do processo. O sistema já operava com um controle de altura do arco que conseguia superar as variações de geometria do chanfro e manter a estabilidade do arco e da poça metálica. Essa é a chamada versão MIG/MAG Pulsado Adaptativo.

Para a busca por resultados melhores, a peça retilínea que foi enviada ao LABSOLDA foi preparada novamente para ser soldada com o processo MIG/MAG pulsado adaptativo nos passes de enchimento. Adicionalmente, o passe de raiz foi testado novamente com o processo MIG/MAG convencional, pois sua qualidade não havia sido considerada satisfatória efetuada com o processo MIG/MAG pulsado.

#### **4.5 Soldagem na peça retilínea enviada pela empresa (2)**

Com o processo MIG/MAG convencional o passe de raiz continuou com o surgimento de faltas de penetração, porém menores e também demonstrou qualidade superficial melhor do que

no ensaio realizado com o processo MIG/MAG pulsado. O aspecto superficial do cordão pode ser visualizado na Figura 40. Os parâmetros utilizados foram os mesmos da Tabela 12.



Figura 40. Passe de raiz soldado com o processo MIG/MAG convencional

Os passes de enchimento soldados com o processo MIG/MAG pulsado adaptativo demonstraram qualidade satisfatória. Este processo foi utilizado para a soldagem dos passes de enchimento do MCV na empresa. O aspecto visual dos cordões pode ser verificado na Figura 41 e os parâmetros utilizados estão demonstrados na Tabela 13.



Figura 41. Passe de enchimento soldado com o processo MIG/MAG pulsado adaptativo - IMC

#### **4.6 Tentativa de eliminação da falta de penetração no passe de raiz**

Eliminar a falta de penetração implica em uma primeira instância, trabalhar com uma maior energia de soldagem, o que não é possível em função da grande abertura do chanfro, que foi configurado para uma soldagem manual.

Para a soldagem mecanizada havia a necessidade da redução da distância entre o tubo e a barbatana. Dessa maneira seria possível o uso de níveis de energia mais elevados sem o escorrimento do material fundido. Na atual configuração isto se torna inviável, pois haveria problemas de escorrimento demasiado do cordão e também da falta de fusão da barbatana na posição horizontal, como já visto anteriormente em testes experimentais.

Na atual configuração sempre há a presença de falta de penetração, conforme pode ser verificado nas macrografias da Figura 42 de corpos de prova soldados com o gap de 6 a 8 mm.

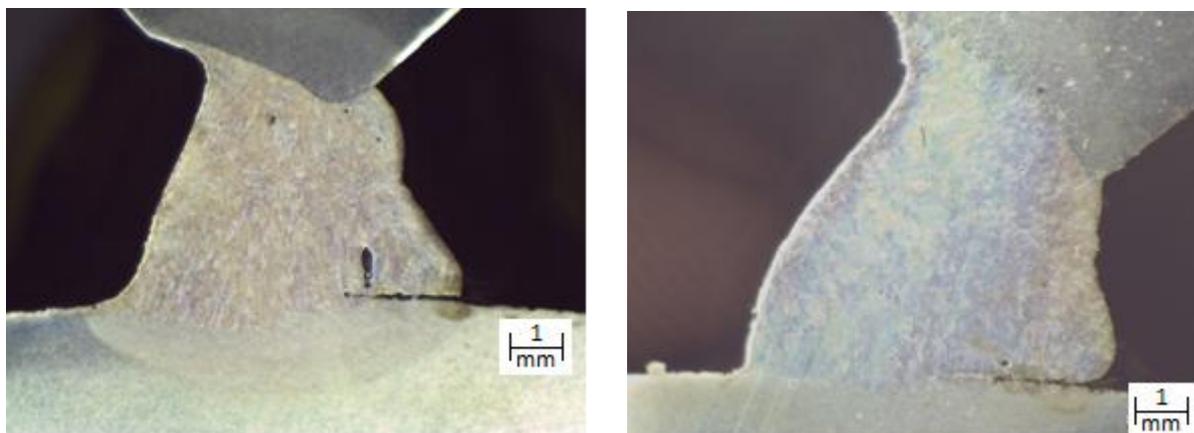


Figura 42. Macrografias de corpos de prova soldados com o gap utilizado atualmente

Na nova configuração sugerida o gap existente entre o tubo e a barbatana seria reduzido de 6 a 8 mm, para 3 a 5 mm. Essa alteração possibilitaria o uso de níveis de energia mais elevados conforme pode ser verificado analisando-se os parâmetros da Tabela 11, que são os utilizados na nova solução para o passe de raiz. Além disso, a geometria do backing utilizado também seria alterada, trazendo-o mais próximo do centro da junta.

Tabela 11. Parâmetros de soldagem utilizados na nova solução para o passe de raiz

Fonte		Tartílope	
Programa	MIG/MAG convencional	Vs (cm/min)	40
Va (m/min)	10	Tecimento	Trapezoidal
U (V)	26	F (Hz)	3
Ks e Kd	25	A (mm)	2,5
Gás	75%Ar+25%CO <sub>2</sub>	tp (s)	0
Vazão de gás (l/min)	15	Uso de backing cerâmico	

O resultado do corpo de prova soldado com os parâmetros da Tabela 11 pode ser verificado na macrografia da Figura 43.

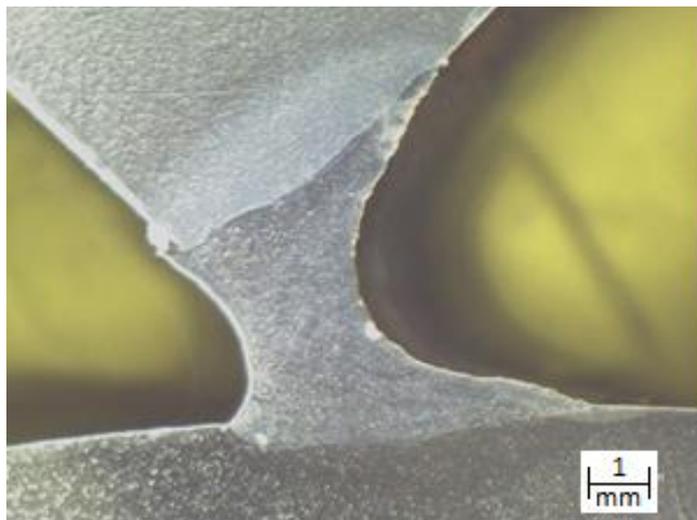


Figura 43. Macrografia do teste para eliminação da falta de penetração na raiz

Com a solução sugerida, a falta de penetração da raiz foi eliminada. Todavia, sua utilização implicaria em alterações na atual configuração de preparação da junta para a soldagem do MCV. Mesmo assim, o ensaio realizado é bastante preliminar e, apesar de ter apresentado um resultado promissor, ainda é necessária uma avaliação mais criteriosa para a sua implementação na peça real.

#### 4.7 Soldagem do MCV na empresa

Os trabalhos realizados na empresa pela equipe do LABSOLDA ocorreram entre 15 e 19/12/2014. Na ocasião, o objetivo era a instalação de todo o sistema de automatização de soldagem (trilhos, manipuladores robóticos e fontes de soldagem) e a soldagem de um MCV para validação e verificação da qualidade via ensaios não destrutivos.

Foram instalados dois conjuntos (tartilope e fonte) juntamente com todo o aparato necessário (gases de proteção, reguladores de vazão, arames de adição, extensões elétricas, entre outros).

Para um melhor entendimento, a junta foi dividida em “lado 1” (frontal), lado onde foi efetuado o passe de raiz e “lado 2” (posterior), verso da raiz, conforme demonstrado na Figura 44.



Figura 44. Identificação dos lados da peça MCV

#### 4.7.1 Soldagem do lado 1 - frontal

A soldagem do lado 1 (frontal) da junta iniciou-se pelo passe de raiz com o processo MIG/MAG convencional, modo de transferência por curto-circuito. Os parâmetros utilizados para tal estão demonstrados na Tabela 12.

Tabela 12. Parâmetros de soldagem regulados para o passe de raiz do MCV

Fonte		Tartilope	
Programa	MIG/MAG convencional	Vs (cm/min)	10
U (V)	20,5	Tecimento	Trapezoidal
Va (m/min)	4,5	F (Hz)	0,7
Ks	80	A (mm)	5,5
Kd	80	tp (s)	0
Gás	85%Ar+15%CO <sub>2</sub>		
Vazão de gás (l/min)	15		

Foram realizadas três camadas de cordões após a raiz para garantir o reforço necessário para a goivagem do verso da raiz, procedimento efetuado comumente segundo os colaboradores da empresa.

Os passes de enchimento foram efetuados com o processo MIG/MAG pulsado adaptativo. O uso da pulsação da corrente se deve à possibilidade do uso de maiores níveis de corrente em comparação ao curto-circuito e também devido à maior molhabilidade dos cordões gerados. Os parâmetros elétricos regulados foram pouco alterados durante a soldagem. Já os parâmetros de movimentação tiveram uma atuação mais frequente por parte do operador (velocidade de

soldagem e frequência de tecimento principalmente). Os parâmetros de referência são apresentados na Tabela 13:

Tabela 13. Parâmetros de soldagem de referência utilizados nos passes de enchimento

Fonte		Tartílope	
Programa	MIG/MAG Pulsado sinérgico adaptativo (ER80S-D2)	Vs (cm/min)	34,7
Im (A)	150	Tecimento	Trapezoidal
a (V)	23	F (Hz)	2,3
Gás	85%Ar+15%CO <sub>2</sub>	A (mm)	2,5
Vazão de gás (l/min)	15	tp (s)	0

Para a verificação dos parâmetros foi feita a aquisição de dados de corrente e tensão por intermédio do SAP (sistema de aquisição de dados portátil), conforme pode ser verificado na Figura 45.

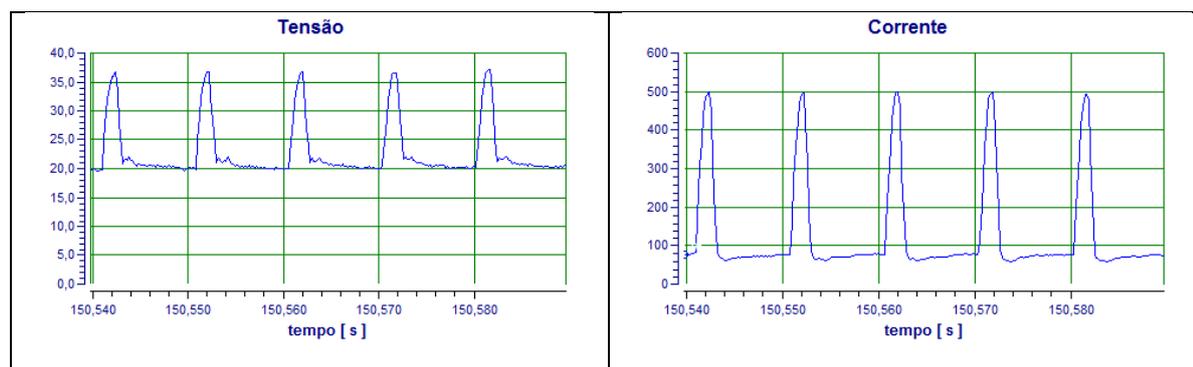


Figura 45. Oscilogramas de tensão e corrente para os passes de enchimento

Adicionalmente foram coletados os valores médios e eficazes de corrente e tensão do processo, além da velocidade média de alimentação do arame, conforme demonstrado na Tabela 14.

Tabela 14. Valores médios e eficazes para os passes de enchimento

Tensão média - Um (V)	22,8
Corrente média - Im (A)	130
Tensão eficaz - U-rms (V)	23,5
Corrente eficaz - I-rms (A)	185,5
Velocidade de arame (m/min)	4

Com as três camadas de reforço (aproximadamente 9 passes) finalizadas, o verso da raiz foi submetido a ensaio de líquido penetrante, conforme a Figura 46. O ensaio revelou algumas regiões com falta de fusão.



Figura 46. Ensaio de líquido penetrante na raiz

#### **4.7.2 Soldagem no lado 2 - posterior (raiz)**

O verso da raiz apresentou problemas de falta de fusão, principalmente entre os cordões e o tubo. Para remover os defeitos, inicialmente tentou-se efetuar goivagem por esmerilhamento. Contudo a profundidade ficou demasiadamente grande, sendo necessária a goivagem com eletrodo de carvão.

Finalizada a goivagem, a junta foi limpa e preparada para soldagem. Os primeiros passes de solda realizados no lado 2 foram em uma profundidade maior do que do lado 1. A irregularidade da junta ocorrida em função da goivagem e do fechamento do GAP durante a soldagem do passe de raiz exigiu a realização de passes intermediários menores, que tiveram a função de uniformizar a geometria do chanfro.

Na Tabela 15 é possível verificar os parâmetros utilizados para a soldagem dos primeiros passes do lado 2 após a raiz. Estes passes foram também realizados com MIG/MAG convencional para garantir a penetração dos cordões.

Tabela 15. Parâmetros de soldagem regulados para o primeiro passe no lado 2

Fonte		Tartilope	
Programa	MIG/MAG convencional	Vs (cm/min)	26,5
U (V)	20,2	Tecimento	Trapezoidal
Va (m/min)	5,0	F (Hz)	1,2
Ks	80	A (mm)	5,5
Kd	80	tp (s)	0
Gás	85%Ar+15%CO <sub>2</sub>		
Vazão de gás (l/min)	15		

Para o acompanhamento do processo foram realizadas aquisições dos dados de tensão, corrente e velocidade de arame. Para isso foi utilizado o SAP (Sistema de aquisição de dados portátil). A estabilidade do processo e da transferência metálica pode ser observada pelos oscilogramas de tensão e corrente mostrados na Figura 47.

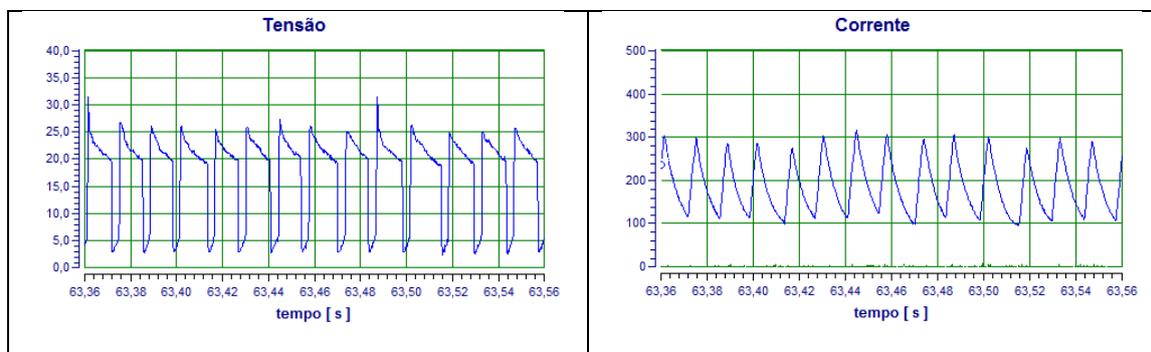


Figura 47. Oscilogramas de tensão e corrente para o primeiro passe de solda do lado 2

Coletaram-se também os valores médios e eficazes de tensão e corrente, além da velocidade média de alimentação de arame, como apresentado na Tabela 16.

Tabela 16. Valores médios e eficazes para o Passe 1 Lado 2

Tensão média - Um (V)	17,8
Corrente média - Im (A)	172
Tensão eficaz - U-rms (V)	19,3
Corrente eficaz - I-rms (A)	182
Velocidade de arame (m/min)	5

Garantida a uniformidade da junta, foi possível iniciar a soldagem dos passes de enchimento com o processo MIG/MAG pulsado adaptativo. O lado 2 foi soldado até que o reforço estivesse igualado ao do lado 1. A partir disso ambos os lados foram soldados simultaneamente até o fechamento da junta. Isto garante a minimização do empenamento causado pela soldagem.

Ao todo, foram realizados 55 passes de solda completos em cada lado da junta.

Os parâmetros elétricos regulados foram pouco alterados durante a soldagem, salvo situações que exigiam uma regulação no comprimento do arco em função de variações demasiadas da distância entre bico de contato e peça. Já os parâmetros de movimentação tiveram uma atuação mais frequente por parte do operador e são dependentes das condições da junta e da posição de soldagem. Os parâmetros de referência são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17. Parâmetros de soldagem de referência utilizados nos passes de enchimento do MCV

Fonte		Tartilope	
Programa	MIG/MAG Pulsado sinérgico adaptativo	Vs (cm/min)	34,7
Im (A)	150	Tecimento	Trapezoidal
a (V)	23	F (Hz)	2,3
Gás	85%Ar+15%CO <sub>2</sub>	A (mm)	2,5
Vazão de gás (l/min)	15	tp (s)	0

Para o acompanhamento dos parâmetros de soldagem foi feita a aquisição dos oscilogramas de corrente e tensão por intermédio do SAP, conforme pode ser verificado na Figura 48.

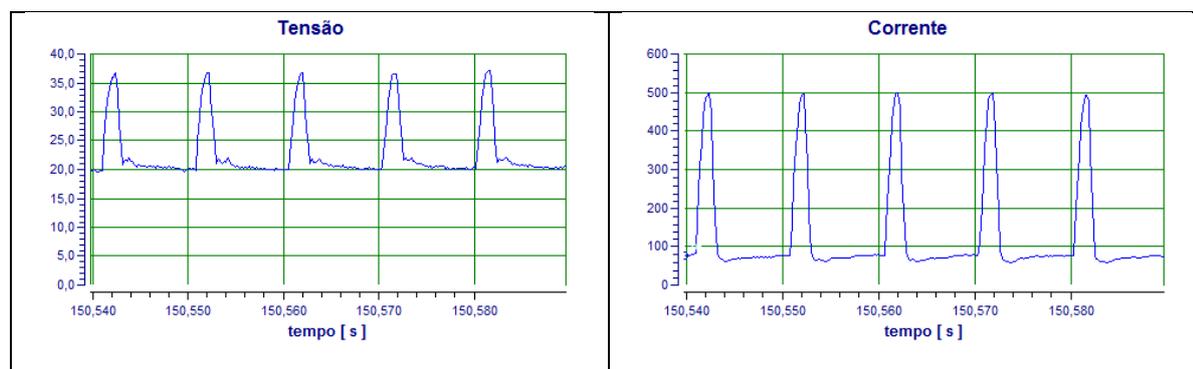


Figura 48. Oscilogramas de tensão e corrente para o passe de solda n°11 no lado 2

Adicionalmente foram coletados os valores médios e eficazes de corrente e tensão do processo, além da velocidade média de arame, conforme demonstrado na Tabela 18.

Tabela 18. Valores médios e eficazes para o Passe 11 do enchimento no Lado 2

Tensão média - $U_m$ (V)	22,8
Corrente média - $I_m$ (A)	130
Tensão eficaz - $U_{rms}$ (V)	23,5
Corrente eficaz - $I_{rms}$ (A)	185,5
Velocidade de arame (m/min)	4

A média de tempo de arco aberto para os passes de enchimento efetuada com base nos dados coletados dos oscilogramas de cordões completos foi de 6 minutos e 30 segundos. O tempo médio entre passes foi de aproximadamente 5 minutos. E 55 cordões foram soldados em cada lado da junta. Com estes dados foi possível realizar uma estimativa aproximada do tempo necessário para o fechamento completo da junta tubo - barbatana do MCV, que foi de aproximadamente 10 horas. Mais rápido do que o procedimento atual que demora aproximadamente dois dias para o fechamento completo da junta.

A Figura 49 demonstra o aspecto dos cordões de enchimento da junta na soldagem do MCV durante aplicação na empresa.



Figura 49. Aspecto superficial dos depósitos de enchimento na soldagem do MCV nas instalações da empresa

Apesar de a soldagem do MCV ter sido efetuada, alguns fatos precisam ser considerados. Estes fatos serão descritos a seguir.

### **4.7.3 Fatos ocorridos e hipóteses levantadas**

Durante a soldagem do MCV pela equipe do LABSOLDA em loco na empresa, ocorreram alguns fatos que serão explanados a seguir. Estes acontecimentos foram eventos totalmente inesperados e demandaram de iniciativa rápida por parte da equipe para a solução dos mesmos.

#### **4.7.3.1 Soldagem de raiz - o que fazer para obter uma raiz adequada**

O passe de raiz soldado na empresa teve faltas de penetração elevadas. Foram discutidas algumas possibilidades de atuação para chegar a um procedimento de execução mecanizada da raiz que garantisse a total penetração na raiz. O problema atual é a falta de fusão no tubo, e a variável que melhor responderia a isto seria a corrente de soldagem. Entretanto, as diferentes posições de soldagem somadas ao gap demasiadamente grande limitam o aumento da corrente. Nessas condições, o uso de maiores níveis de corrente implicaria no escorrimento da poça de fusão.

Para a soldagem mecanizada, poderia ser aplicada uma maior corrente de soldagem se a configuração da junta fosse alterada, como por exemplo, utilizando um gap menor e também fazendo o uso de geometrias de backing cerâmico. A junta atualmente utilizada foi concebida para soldagem manual, o que determina as condições de ângulo de abertura e distanciamento mínimo. Esta seria uma primeira estratégia para prospecção do procedimento da raiz.

Outras frentes que poderiam ser trabalhadas seriam novas versões do processo MIG/MAG como o CCC ou ainda versões com característica de alta capacidade de penetração, similares ao RapidArc do fabricante Lincoln.

#### **4.7.3.2 Instabilidades do arco e problemas com cabos**

Durante a soldagem do MCV na empresa, algumas instabilidades foram verificadas no processo pulsado adaptativo. Estas instabilidades foram principalmente a ocorrência de curtos excessivos e interrupções inesperadas do arco voltaico. Algumas hipóteses foram levantadas para tentar explicar tais instabilidades.

É utilizada uma versão adaptativa do modo Pulsado. Essa versão monitora os níveis de tensão e realiza o controle sobre a corrente para manter a estabilidade do comprimento de arco (altura do arco voltaico constante). Em função do movimento de tecimento e da geometria da

junta há variação constante de distância entre o bico de contato e a peça (DBCP). Se as variáveis de controle não estiverem bem calibradas poderão ocorrer problemas com a estabilidade. Além disso, a variação da geometria do chanfro pode provocar eventuais curtos. Outra hipótese seria de que a lógica de controle e atuação no momento do curto-circuito não está adequada e então caso ocorresse curtos o sistema poderia “se perder”.

Além disso, foi observado aquecimento de cabos e conexões durante o turno de trabalho prolongado. O sistema de controle se baseia na leitura de tensão. O aquecimento dos cabos e conexões dá indícios de que existe queda de tensão (elevação da resistência) nesses pontos e esse valor muda em função da variação de temperatura. Como o controle é baseado em um valor de referência, as quedas de tensão do cabo podem estar influenciando na determinação do correto nível de tensão de referência do processo.

Tendo isto em vista, para resolver o problema de aquecimento dos cabos deve-se realizar a substituição por cabos de maior diâmetro.

Outra hipótese que também foi levantada é o posicionamento do cabo terra, o qual pode ser testado com fixação mais rígida do que com alicates e também com aplicação em dois ou mais pontos ao longo da junta, pois um dos principais problemas verificados foi o início do acontecimento de curtos-circuitos após aproximadamente a metade da junta. Sopro magnético tem influência crítica para soldagem MIG/MAG pulsada.

#### **4.7.3.3 Falha do tartilope**

Depois de algumas horas de uso o gabinete eletrônico de um dos tartilopes parou de funcionar. Não ligava mais. Então se buscou investigar o que havia ocorrido.

Foi verificado que a fonte de alimentação 48V DC dos drivers dos motores havia queimado. Provavelmente, devido ao ambiente quente e com grande quantidade de poeira em suspensão no ar.

Esse é um item adquirido de outro fornecedor e a causa da sua falha não foi identificada, mas possivelmente tenha sido por sobreaquecimento. Uma opção para tentar prevenir futuros problemas seria substituir as fontes atuais por comerciais consolidados no mercado. Além disso, a ventilação interna do gabinete deve ser melhorada com o uso de coolers de maior capacidade.

#### 4.7.3.4 Porosidades no último cordão

Na soldagem dos últimos cordões da junta, ocorreu o surgimento de porosidades ao longo de todo o cordão. Poros como os verificados são verificados geralmente quando não há proteção gasosa adequada.

As hipóteses geradas foram as seguintes:

- Vazão de gás - a vazão foi medida no início das atividades e talvez algum vazamento nas mangueiras e conexões tenha prejudicado a proteção gasosa. Pode ter ocorrido o surgimento de novos vazamentos, que pelo tempo curto para verificação, não foram localizados.
- Uso de bocal estreito - o modelo de bocal utilizado tem um ângulo de fechamento bastante acentuado para garantir acessibilidade da tocha no fundo do chanfro nos passes iniciais. Nessas condições, a própria junta atua como uma "parede" evitando a dispersão do gás. Por outro lado à medida que o depósito de camadas se aproxima da superfície da chapa, o uso de um bocal tão fechado pode contribuir para a ineficiência da proteção gasosa. Uma opção seria substituir o bocal por um modelo de maior abertura assim que a posição relativa da tocha na junta permitir.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como observações finais para o trabalho pode-se citar:

- Com relação ao projeto mecânico dos trilhos e os equipamentos utilizados (fontes de soldagem e manipuladores robóticos) pode-se dizer que, apesar dos problemas que ocorreram, foram considerados aptos para a aplicação;
- Os dois Tartilopes V2F que foram utilizados se deslocam no trilho sem nenhum problema de movimentação (travamentos, vibrações demasiadas, etc.), após algumas adequações necessárias para sua utilização nos trilhos curvos;
- Na parte eletrônica de controle dos manipuladores, salvo o defeito ocorrido na fonte de alimentação dos drivers, nenhum tipo de travamento ou problema de software foi verificado;

- Com relação ao procedimento levantado para a soldagem de união tubo – barbatana do MCV, apesar de ocorridas algumas instabilidades no processo de soldagem nos passes de enchimento, o preenchimento da junta pode ser considerado um sucesso. As análises da peça soldada via END (raio x e ultrassom), consideraram a peça aprovada segundo a norma, apesar de alguns pequenos defeitos encontrados;
- Sobre os problemas ocorridos no passe de raiz, esta não é uma operação trivial. Normalmente, um procedimento levantado terá sucesso em sua execução em condições muito específicas, o que pode interferir na robustez desse procedimento. Por esse motivo é observado, ainda hoje, em diversos setores, que é aceitável e comum a adoção de procedimentos onde a raiz é realizada manualmente. O ganho em produtividade fica por conta da execução mecanizada do enchimento. E para o caso específico do MCV, considerando a grande quantidade de passes (55 em cada lado), não seria a execução manual do passe de raiz que limitaria a produtividade. E ainda assim, há a possibilidade da alteração da geometria da junta para a aplicação automatizada.
- Apesar do sucesso na soldagem do MCV, a consolidação do procedimento de soldagem do MCV na fábrica depende sua aplicação a longo prazo.

## 6 CONCLUSÕES

Inicialmente pode-se dizer que o objetivo do trabalho foi alcançado. A automatização da soldagem de união tubo – barbatana foi efetuada e aprovada em inspeções de qualidade. Os ensaios não destrutivos realizados não demonstraram falhas que causassem a reprovação dos cordões gerados.

Foi gerado um novo programa sinérgico para o arame ER80S-D2 nas fontes de soldagem IMC. Isto torna o equipamento mais completo e contribui para sua aplicação nas empresas e instituições que utilizam o arame citado.

O desenvolvimento de um trabalho da importância e tamanho como este somente foi possível com a integração de toda a equipe do LABSOLDA que envolveu membros da área de projetos mecânicos, de eletrônica, de processos de soldagem, além da contribuição de membros internos e externos que, com sua experiência, auxiliaram no desenvolvimento dos trabalhos.

Apesar de ter sido considerado um sucesso, haverá ainda a fase final que diz respeito à aplicação do procedimento de soldagem automatizado em produção e o treinamento dos

funcionários da empresa para o uso do equipamento. Esta etapa será também de altíssima importância, pois caso não seja seguida corretamente, todo o trabalho até então desenvolvido não terá validade.

Durante a soldagem do MCV pelos membros da equipe do LABSOLDA na empresa houve alguns problemas, anteriormente relatados neste trabalho, que ainda precisam ser corrigidos. Tais problemas causaram dificuldades adicionais para a realização dos trabalhos, contudo não inviabilizaram totalmente a soldagem. Tais problemas serão discutidos em reuniões futuras e solucionados para que a entrega do equipamento à empresa seja isenta de defeitos e falhas.

Um trabalho de complexidade elevada como este com certeza serviu de aprendizado, não apenas para o aluno, mas para todos os participantes, tenham sido eles fortemente ativos ou não. Houve inúmeras discussões e trocas de experiências que enriqueceram profissionalmente todos os envolvidos.

Grande parte das soluções buscadas para o trabalho foram especialmente desenvolvidas para o caso da soldagem do MCV. Este é um grande diferencial da equipe do LABSOLDA, que possui grande flexibilidade e conhecimento para a solução de problemas dos mais variados tipos.

Houve uma série de fatores que dificultaram o andamento do trabalho. O próprio fato de o tamanho das peças ser grande causou dificuldade para alocação e instalação das mesmas, além dos equipamentos necessários para a soldagem automatizada, pois o espaço físico do LABSOLDA não é um ambiente preparado para receber peças do tamanho das que foram soldadas. Contudo com muita criatividade e tendo sempre cuidado com a segurança das pessoas envolvidas antes de mais nada, todos os percalços foram resolvidos e o trabalho pôde seguir a diante.

Por fim, este trabalho deve servir de exemplo para o meio acadêmico e também para o setor industrial brasileiro, pois demonstra que a parceria entre universidade e empresas privadas pode e deve ser um excelente meio de se buscar a otimização dos trabalhos desenvolvidos, capacitando e gerando experiência para estudantes de graduação, mestrado, doutorado, entre outros, além de melhorar as condições de trabalho dos funcionários das empresas. Há atualmente uma barreira enorme entre pesquisa e desenvolvimento nas universidades e a aplicação nas empresas. Contudo não é por falta de capacidade nem de empenho e sim por falta de interesse do setor industrial em investir em longo prazo que trabalhos assim não ocorrem.

## 8 REFERENCIAS

- [1] PIMENTEL J., et al. **Formação do Petróleo: Processo de Decomposição de Matérias Orgânicas**. Revista de Trabalhos Acadêmicos, nº. 02 - Jornada Científica - Suplemento Brasil, 2010
- [2] STARLING, C.M.D. et al. **Comparação do Desempenho Operacional e das Características do Cordão na Soldagem com Diferentes Arames Tubulares**, Soldagem & Inspeção, v.14, n.1, p.10-25, Março 2009.
- [3] STARLING, C.M.D., MODENESI, P.J. **Avaliação da Transferência de Metal de Arames Tubulares**, Soldagem & Inspeção, v.11, n.3, p.147-155, Setembro 2006.
- [4] CARVALHO, R.S. **Robô CNC para a automação da soldagem MIG/MAG em posições e situações de extrema dificuldade**. 2009. 121 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [5] SILVA, R. H. G. **Soldagem MIG/MAG em Transferência Metálica por Curto-Circuito**. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, p. 113. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis
- [6] SOUZA Z. I. **Análise comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW com transferência metálica por curto circuito na posição horizontal**. 2011. 121f. Dissertação (Mestrado em engenharia) Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- [7] DUTRA, J. C. **MIG/MAG - Transferência Metálica por Curto-Circuito - Fontes de Soldagem versus Gases do Arco**. Soldagem e Inspeção, p. 19-24, Jan/Mar 2008.
- [8] AWS. WELDING HANDBOOK – **“Welding Processes”**. 8th. ed. Miami: American Welding Society, v. 2, 1991.
- [9] SPS SISTEMAS E PROCESSOS DE SOLDAGEM. **Manual Tartilope V2F**. Disponível em: <[http://www.sps-soldagem.com.br/tartilope\\_v2f.php](http://www.sps-soldagem.com.br/tartilope_v2f.php)> Acesso em julho de 2015.
- [10] IMC SOLDAGEM. **Manual do Sistema SAP**. Disponível em: <[http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/manuais/sap\\_4\\_manual\\_usuario\\_%282008%29.pdf](http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/manuais/sap_4_manual_usuario_%282008%29.pdf)>. Acesso em julho de 2015.
- [11] IMC SOLDAGEM. **Fonte de Soldagem Digiplus A7**. Disponível em: <<http://www.imc-soldagem.com.br/digiplus.html>> Acesso em julho de 2015.

[12] MILLER WELDS. **Manual of Operatios PipePro 450 RFC**. Disponível em: <[http://www.millerwelds.com/om/o221771k\\_bpg.pdf](http://www.millerwelds.com/om/o221771k_bpg.pdf)> Acesso em julho de 2015.

[13] KNIGHT D., '**Davy, Sir Humphry, baronet (1778–1829)**', Oxford Dictionary of National Biography, Oxford University Press, 2004. Disponível em: <<http://www.oxforddnb.com/>> Acesso: Julho de 2015.

[14] CARY, HOWARD B., et al. **Modern Welding Technology**. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Education, (2005).

[15] DBC GUIAS E TUTORIAIS. **História da solda MIG/MAG (GMAW – Gas metal arc welding)**. Disponível em: <<http://guias.oxigenio.com/historia-da-solda-migmag-gmaw-gas-metal-arc-welding>> Acesso em: julho de 2015.

[16] REVISTA EXAME. **Quanto petróleo o Brasil tem em terra e mar por estado**. Disponível em:<<http://exame.abril.com.br/economia/noticias/quanto-petroleo-o-brasil-tem-por-terra-e-mar#1>> Acessado em setembro de 2015.

[18] P&D ATUAIS LABSOLDA. **Desenvolvimento da Soldagem MIG/MAG em Transferência Metálica por Curto-Circuito com Controle de Corrente para Aplicação em Passes de Raiz**. Disponível em: <[http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/projetos\\_atuais/mig\\_mag\\_cc.php](http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/projetos_atuais/mig_mag_cc.php)> Acessado em setembro de 2015.

[17] SOUZA, Líria Alves de. **"Óleo diesel"; Brasil Escola**. Disponível em <<http://brasilecola.uol.com.br/quimica/oleo-diesel.htm>>. Acesso em 16 de fevereiro de 2017.