

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**INVESTIGAÇÕES PROSPECTIVAS EM PROCESSOS E TÉCNICAS PARA O  
PASSE DE RAIZ NA SOLDAGEM MIG/MAG ORBITAL PARA A UNIÃO DE  
DUTOS**

**Leonardo Coelho Brüggemann**

**FLORIANÓPOLIS**

**2013**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Leonardo Coelho Brüggemann**

**INVESTIGAÇÕES PROSPECTIVAS EM PROCESSOS E TÉCNICAS PARA O  
PASSE DE RAIZ NA SOLDAGEM MIG/MAG ORBITAL PARA A UNIÃO DE  
DUTOS**

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

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

**FLORIANÓPOLIS**

**2013**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Leonardo Coelho Brüggemann

**INVESTIGAÇÕES PROSPECTIVAS EM PROCESSOS E TÉCNICAS PARA O  
PASSE DE RAIZ NA SOLDAGEM MIG/MAG ORBITAL PARA A UNIÃO DE  
DUTOS**

Este trabalho foi julgado adequado para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico sendo aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 2 de Setembro de 2013

---

Prof. Lauro Cezar Nicolazzi, Dr. Eng. Mec.  
Coordenador do Curso

---

Prof. Dylton do Vale Pereira Filho, M. Sc.  
Professor da Disciplina EMC

**BANCA EXAMINADORA**

---

Régis Henrique Gonçalves e Silva, Dr. Eng.  
Orientador

---

Prof. Jair Carlos Dutra, Dr. Eng.

---

Prof. Dylton do Vale Pereira Filho, M, Sc.

Coelho Brüggemann, Leonardo, 1990 –

Investigações prospectivas em processos e técnicas para o passe de raiz na soldagem MIG/MAG orbital para a união de dutos / Leonardo Coelho Brüggemann – 2013. 75f. : il. color.

Orientador: Dr. Eng. Régis Henrique Gonçalves e Silva

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Curso de Engenharia Mecânica, 2013.

1. Soldagem orbital de passe de raiz. 2. MIG/MAG Convencional e *Surface Tension Transfer*. 3. Análise experimental. I. Silva, Régis Henrique Gonçalves. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Curso de Engenharia Mecânica.

*“Nossa maior fraqueza está em desistir. O caminho mais certo de vencer é tentar  
mais uma vez.”*

*Thomas Edison*

*Aos meus pais, Mirian e Jaime,  
à minha irmã, Amanda,  
à minha namorada, Bruna.*

## Agradecimentos

---

Primeiramente agradeço ao Labsolda pela experiência adquirida durante a graduação, pela indicação para realização de meu intercâmbio acadêmico no ISF da RWTH Aachen e pela oportunidade de desenvolver o presente trabalho.

Agradeço também ao programa PRH-09 da ANP, que financiou na maior parte do tempo a minha bolsa de iniciação científica no Labsolda.

Ao Dr. Eng. Régis Henrique Gonçalves e Silva, por toda a experiência repassada, apoio e orientação no desenvolvimento não só do presente trabalho, como também de diversos outros durante a graduação.

Também agradeço ao Prof. Dr. Eng. Jair Carlos Dutra, por ter me aberto as portas do Labsolda, pelo apoio, críticas e ensinamentos, os quais só me fizeram crescer.

À toda a equipe do Labsolda, pela amizade, pelas horas divertidas, pelos ensinamentos nesses anos todos e pela ajuda em muitas tarefas. Em especial aos amigos (as) Rafael Nunes, Bruna Savi, Ivan Pigozzo, Hellinton Direne, Ramon Meller, Everton Werlang, Natália Dreveck, Ricardo Campagnin e Claudio da Silva.

Agradeço também aos meus colegas e amigos de graduação, pela amizade, apoio, horas de “Platão” e encontros no “Zinga”. Em especial agradeço aos amigos Roland Montenegro, Sérgio Galliza, Marco Timmermann, Rodolfo Espíndola, Thiago Uvo, Edgar Favaretto, Tiago Souza, Victor Roeder, Henrique Schmitz, Felipe Meirelles e Fábio Sena.

Aos meus pais, Mirian e Jaime, por todo carinho, apoio e incentivo que tive durante todas as etapas de minha vida. Sem vocês eu não teria chegado até aqui!

À minha irmã, Amanda, pelo afeto e carinho e por ser tão especial em minha vida.

À minha namorada, Bruna Gelsleichter, por todo apoio, carinho, compreensão e risadas durante esses anos juntos.

Enfim, muito obrigado a todos!

## Resumo

---

A soldagem circunferencial na posição 5G é fundamental para a união de dutos que transportam óleo cru e seus derivados, sendo assim de suma importância para a expansão do setor energético brasileiro. Nos últimos anos o processo de soldagem MIG/MAG Convencional e suas variantes têm sido utilizados na execução de passes de raiz de forma mecanizada (soldagem orbital), possibilitando ganhos em produtividade e qualidade ainda de maneira exploratória. No entanto, ainda não há consolidação e unificação de técnicas para aplicação. Dentro deste contexto este trabalho apresenta um estudo amplo desde a usinagem dos chanfros de um tubo, até a completa soldagem de um passe de raiz neste. São estudados os processos MIG/MAG Convencional por curto circuito, para a soldagem com um backing interno de cobre ou cerâmica, assim como o processo *Surface Tension Transfer* (STT), sem o uso de backing e com CO<sub>2</sub> puro, ambos de forma mecanizada por meio de um manipulador robótico (Tartilope V4). Foram estabelecidos e mantidos critérios para os ensaios comparativos. As dificuldades encontradas durante a usinagem e alinhamento dos tubos foram detalhadas. Dos cordões de solda executados foram preparadas macrografias e radiografias, as quais possibilitaram a análise destes por meio da Norma API 1104. A estabilidade dos processos foi também analisada por meio de aquisição de dados durante a soldagem. Por fim são demonstrados os resultados obtidos e a possibilidade de execução de passes de raiz com ambos os processos. É ainda demonstrada a possibilidade de eliminação do passe quente quando soldando com o processo STT.

**Palavras Chave:** 1. Soldagem Orbital Mecanizada; 2. MIG/MAG Convencional; 3. STT; 4. Passe de Raiz; 5. Norma API 1104

## Abstract

---

The circumferential welding in the 5G position is essential for the joining of pipelines, through which oil and its derivatives are transported. It is thus extremely important for the development of the Brazilian energy sector. In the last years the GMAW (Gas Metal Arc Welding) process and its derivatives, both mechanized (orbital welding), have been used for the welding of the root pass, guaranteeing higher productivity and quality still at an exploratory stage. However, there is still no consolidation and unification of the techniques for its application. Under the given conditions the present work presents a broad study since the milling of the pipe bevel to the complete welding of the root pass. The GMAW-S process, supported by an internal cooper or ceramic backing, as well as the *Surface Tension Transfer* (STT) process, without a backing and with pure CO<sub>2</sub> as shielding gas, are mechanized applied making use of a robot (Tartílope V4). Criteria have been established and kept for the comparative experiments. The challenges faced during the milling and alignment of two pipe sections are reported. From the root weld beads, macrographs and radiographies are prepared, those allow the evaluation of the weld beads quality through the Norm API 1104. The stability of the processes is also evaluated making use of an acquisition system, used during the welding. At the conclusion the results, as well as the possibility of welding with both processes, are shown. The STT process may even allow the elimination of the hot pass, as described in the text.

**Palavras Chave:** 1. Mechanized Orbital Welding; 2. GMAW; 3. STT; 4. Root Pass; 5. Norm API 1104

## Lista de Figuras

Figura 1 - Passes de soldagem.....	1
Figura 2 - Tubos distribuídos ao longo da faixa de domínio .....	6
Figura 3 - Abaixamento das colunas .....	7
Figura 4 - Técnicas primárias de lançamento de dutos submarinos .....	8
Figura 5 - Soldagem do passe de raiz e quente e <i>rack</i> de alimentação no primeiro plano.....	9
Figura 6 - <i>Racks</i> externos e racks de estocagem dos <i>stalks</i> .....	10
Figura 7 - a) Carretel a bordo do navio de lançamento; b) Estação <i>tie-in</i> .....	10
Figura 8 - Posição de soldagem 5G PG e PF .....	11
Figura 9 - Potência instantânea dos processos CCC e MIG/MAG Convencional	12
Figura 10 - Chanfro "U" e "V" e suas denominações.....	14
Figura 11 - Esquema posição do <i>backing</i> .....	15
Figura 12 - Acopladeira interna de tubos com <i>backing</i> de cobre.....	15
Figura 13 - a) Soldagem na descendente b) Soldagem na ascendente.....	17
Figura 14 - Soldagem orbital de com SMAW .....	18
Figura 15 - TIG mecanizado com alimentação de arame.....	19
Figura 16 - Passe de raiz executado com "Laser Nd:YAG - MIG/MAG" e enchimento com MIG/MAG de alta produtividade .....	20
Figura 17 - Soldagem <i>Flash Butt</i> .....	20
Figura 18 - Equipamentos básicos para o processo MIG/MAG Convencional ....	22
Figura 19 - Esquema da dinâmica do processo durante a soldagem.....	23
Figura 20 - Corrente de soldagem em função da velocidade de arame .....	23
Figura 21 - Efeito da indutância sobre a corrente de soldagem .....	24
Figura 22 - Modos de transferência metálica para arame de 1,2 mm e gás de proteção Ar/He/CO <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> - 65/26,5/8/0,5 .....	25
Figura 23 - Transferência metálica por curto circuito para o processo MIG/MAG Convencional.....	26
Figura 24 - Transferência metálica por curto circuito para o processo STT .....	28
Figura 25 - a) Penetração inadequada devido a presença de high-low b) Sem high-low.....	30
Figura 26 - a) Falta de fusão exposta à superfície b) Falta de fusão não exposta à superfície.....	31
Figura 27 - Concavidade face interna da raiz.....	31
Figura 28 - Perfuração ( <i>BurnThrough</i> ) na raiz.....	31
Figura 29 - Inclusões de escória .....	32
Figura 30 - Porosidade dispersa .....	32
Figura 31 - Critério de aceitação para distribuição de poros .....	32
Figura 32 - a) Fonte de soldagem IMC Digitec 600; b) Fonte de soldagem Power Wave 455m/STT .....	35
Figura 33 - a) Tatílope V4; b) SAP .....	36
Figura 34 - Bancada de Soldagem.....	37

Figura 35 – a) Bancada de corte de tubos; b) Usinagem do chanfro .....	37
Figura 36 - <i>Backing</i> de cobre e de cerâmica .....	38
Figura 37 - À esquerda as duas geometrias de chanfro adotadas e à direita o corpo de prova .....	39
Figura 38 - Posição do corte das macrografias .....	41
Figura 39 - Esquema medição nos cordões de solda .....	41
Figura 40 - Posição das sapatas e regiões de deformação do corpo de prova durante usinagem.....	42
Figura 41 - Cordão de solda MIG/MAG Convencional com arame de 1,2 mm.....	45
Figura 42 - Macrografias MIG/MAG Convencional com arame de 1,2 mm: a) posição plana, b) vertical e c) sobre cabeça .....	45
Figura 43 - Radiografia do cordão de solda MIG/MAG Convencional com arame de 1,2 mm .....	46
Figura 44 - Ciclograma I x U do processo MIG/MAG Convencional com arame de 1,2 mm .....	47
Figura 45 - Histograma do processo MIG/MAG Convencional com arame de 1,2 mm .....	48
Figura 46 - Cordão de solda MIG/MAG Convencional com arame de 1,0 mm.....	49
Figura 47 - Macrografias MIG/MAG Convencional com arame de 1,0 mm: a) posição plana, b) vertical e c) sobre cabeça .....	49
Figura 48 - Radiografias do cordão de solda MIG/MAG Convencional com arame de 1,0 mm .....	50
Figura 49 - Ciclograma do processo MIG/MAG Convencional com arame de 1,0 mm .....	51
Figura 50 - Histograma do processo MIG/MAG Convencional com arame de 1,0 mm .....	52
Figura 51 - Cordão de solda do processo STT com arame de 1,2 mm .....	53
Figura 52 - Macrografias do cordão de solda do processo STT com arame de 1,2 mm: a) posição plana, b) vertical e c) sobre cabeça .....	54
Figura 53 - Radiografia do cordão de solda do processo STT com arame de 1,2 mm .....	55
Figura 54 - Ciclograma I x U do processo STT com arame de 1,2 mm.....	56
Figura 55 - Cordão de solda do processo STT com arame de 1,0 mm .....	57
Figura 56 - Macrografias do cordão de solda do processo STT com arame de 1,0 mm: a) posição plana, b) vertical e c) sobre cabeça .....	57
Figura 57 - Radiografia do cordão de solda do processo STT com arame de 1,0 mm .....	58
Figura 58 - Ciclograma do processo STT com arame de 1,0 mm .....	59
Figura 59 - Cordão de solda do processo STT com CO <sub>2</sub> .....	61
Figura 60 - Macrografias do cordão de solda do processo STT com CO <sub>2</sub> : a) posição plana, b) vertical e c) sobre cabeça .....	61
Figura 61 - Radiografia do cordão de solda com o processo STT com CO <sub>2</sub> .....	62
Figura 62 – Ciclograma I x U do processo STT com CO <sub>2</sub> .....	63

Figura 63 - Esquema posicionamento do <i>backing</i> de cerâmica .....	64
Figura 64 - Cordão de solda com o processo MIG/MAG Convencional com <i>backing</i> de cerâmica.....	65
Figura 65 - Macrografias do cordão de solda com o processo MIG/MAG Convencional com <i>backing</i> de cerâmica: a) posição plana, b) vertical e c) sobre cabeça.....	65
Figura 66 - Radiografia do cordão de solda com o processo MIG/MAG Convencional com <i>backing</i> de cerâmica .....	67
Figura 67 - Imagem da região da fratura .....	67
Figura 68 - Ciclograma I x U do processo MIG/MAG Convencional com <i>backing</i> de cerâmica.....	68
Figura 69 - Histograma do processo MIG/MAG Convencional com <i>backing</i> de cerâmica.....	68
Figura 70 – Trecho da variação da amplitude de tecimento em um teste feito na ascendente com $f=5$ Hz e $a=1,0$ mm.....	69

## Lista de Tabelas

---

Tabela 1 - Técnicas primárias de lançamento de dutos submarinos e suas características .....	8
Tabela 2 - Tempo e número de soldas para obtenção do retorno financeiro .....	13
Tabela 3 - Critério de aceitação de defeitos. Onde $l$ indica o comprimento principal do defeito (individual ou total), $L$ o comprimento do cordão de solda, $w$ a largura do defeito e $t$ a espessura do tubo.....	33
Tabela 4 - Especificação técnica SAP .....	36
Tabela 5 - Planejamento dos experimentos .....	40
Tabela 6 - Tabela execução dos experimentos MIG/MAG Convencional com arame de 1,2 mm .....	44
Tabela 7 - - Medidas cordão de solda MIG/MAG Convencional com arame de 1,2 mm .....	46
Tabela 8 - Tabela de execução dos experimentos com MIG/MAG Convencional com arame de 1,0 mm.....	48
Tabela 9 - Medidas do cordão de solda MIG/MAG Convencional com arame de 1,0 mm .....	50
Tabela 10 - Tabela de execução dos experimentos com o processo STT com arame de 1,2 mm .....	53
Tabela 11 - Medidas do cordão de solda do processo STT com arame de 1,2 mm .....	54
Tabela 12 - Tabela com a execução dos experimentos com o processo STT com arame de 1,0 mm .....	56
Tabela 13 - Medidas das macrografias do cordão de solda do processo STT com arame de 1,0 mm .....	58
Tabela 14 - Parâmetros de soldagem adotados para a execução do processo STT com CO <sub>2</sub> .....	60
Tabela 15 - Medições das macrografias do cordão de solda do processo STT com CO <sub>2</sub> .....	62
Tabela 16 - Parâmetros adotados para a execução do experimento com o processo MIG/MAG Convencional com <i>backing</i> de cerâmica.....	64
Tabela 17 - Medidas das macrografias do cordão de solda do processo MIG/MAG Convencional com <i>backing</i> de cerâmica .....	65

## Lista de Símbolos

### Símbolos Gerais

Símbolo	Descrição	Unidade
$Va$	Velocidade de alimentação de arame	$m/min$
$U$	Tensão elétrica	$V$
$Ks$	Coeficiente de indutância de subida	<i>adimensional</i>
$Kd$	Coeficiente de indutância de descida	<i>adimensional</i>
$Vs$	Velocidade de soldagem	$cm/min$
$a$	Amplitude de tecimento	$mm$
$f$	Frequência de tecimento	$Hz$
$\alpha_{tocha}$	Ângulo de inclinação da tocha (puxando)	<i>graus</i>
$Im$	Corrente elétrica de soldagem média	$A$
$Um$	Tensão elétrica média	$V$

### Abreviaturas

Abreviatura	Descrição
<i>MIG/MAG</i>	Metal Inert/Active Gas
<i>SMAW</i>	Shielded Metal Arc Welding (Eletrodo Revestido)
<i>STT</i>	Surface Tension Transfer
<i>DBCP</i>	Distância bico peça
<i>Área Tot.</i>	Área total transversal do cordão de solda
<i>Ângulo M.</i>	Ângulo de molhabilidade entre a face interna do tubo e o reforço da raiz
<i>Área Dil.</i>	Área diluída. Corresponde a região fundida do chanfro

*R. Raiz*

Reforço da raiz. Maior distância compreendida entre a parede interna do tubo e o reforço interno da raiz

## Sumário

---

1	Introdução .....	1
1.1	Motivação.....	2
1.2	Objetivos .....	3
2	Fundamentação Teórica .....	5
2.1	União de Tubos.....	5
2.1.1	Fabricação de Dutos Terrestres ( <i>Onshore</i> ) .....	5
2.1.2	Fabricação de Dutos Submarinos ( <i>Offshore</i> ).....	7
2.1.3	Passe de Raiz Mecanizado por MIG/MAG Convencional e Suas Variantes .....	11
2.1.4	Outras Técnicas de União de Dutos .....	17
2.2	Fundamentos dos Processos de Soldagem Abordados.....	21
2.2.1	MIG/MAG Convencional Por Curto Circuito.....	21
2.2.2	<i>Surface Tension Transfer</i> (STT) .....	26
2.3	Norma API 1104.....	29
3	Equipamentos, Materiais e Métodos .....	35
3.1	Equipamentos .....	35
3.2	Materiais.....	38
3.3	Métodos .....	38
4	Resultados e Discussões .....	42
4.1	Desafios na Preparação dos Tubos .....	42
4.2	Experimentos MIG/MAG Convencional.....	43
4.2.1	Chanfro U, Arame 1,2 mm e <i>Backing</i> de Cobre.....	43
4.2.2	Chanfro U, Arame 1,0 mm e <i>Backing</i> de Cobre.....	48
4.2.3	Chanfro V, Arame 1,0 mm e 1,2 mm e <i>Backing</i> de Cobre.....	52
4.3	Experimentos Processo STT .....	52
4.3.1	Chanfro V e Arame 1,2 mm .....	52
4.3.2	Chanfro V e Arame de 1,0 mm .....	56
4.3.3	Chanfro U e Arame de 1,0 mm e 1,2 mm .....	59
4.4	Experimentos Extras .....	59
4.4.1	STT com CO <sub>2</sub> .....	60
4.4.2	MIG/MAG Convencional com <i>Backing</i> de Cerâmica .....	63

5	Conclusões .....	69
6	Trabalhos Futuros .....	72
7	Referências .....	73

## 1 Introdução

A soldagem orbital, onde a peça permanece imóvel enquanto a tocha é movimentada ao longo de uma circunferência, é a forma utilizada para unir as seções de tubo constituintes de linhas dutoviárias, já que seria impossível rotacionar uma tubulação inteira mantendo a tocha estática. No Brasil, na vasta maioria das vezes na construção de linhas dutoviárias, ela é feita de forma manual com eletrodo revestido (SMAW). O emprego de um processo de soldagem que possibilite a fácil mecanização e/ou automatização da soldagem orbital, o que não é o caso do SMAW, reduz a dependência de uma mão de obra cada vez mais escassa e cara: soldadores experientes. Com o emprego de um processo automatizado/mechanizado o treinamento de soldadores pode ser feito em poucas semanas. O emprego de um processo mecanizado/automatizado permite, por sua natureza, repetitividade das juntas soldadas, o que diminui refugos e reparos, e ainda aumenta a velocidade de soldagem das juntas, especialmente no caso onde há tubulações de grandes diâmetros [1]. Dentre os processos clássicos que podem ser facilmente mecanizados destacam-se o TIG (*Tungsten Inert Gas*) e o MIG/MAG (*Metal Inert/Active Gas*). Este último será objeto de estudo deste trabalho.

O processo MIG/MAG Convencional, com transferência metálica por curto circuito, e o processo STT (*Surface Tension Transfer*) da Lincoln, uma variante do MIG/MAG por curto circuito, cujo controle é feito pela corrente elétrica, serão explorados no presente trabalho. Ambos serão aplicados de forma mecanizada para a realização de soldagem orbital em tubos de 406,4 mm (16 in) de diâmetro externo, similares aos utilizados em algumas linhas dutoviárias. Mais especificamente, esses processos serão estudados e procedimentos qualificados, de modo a se obter passes de raiz nessas tubulações (Figura 1), os quais atendam a Norma API 1104 (*American Petroleum Institute*).

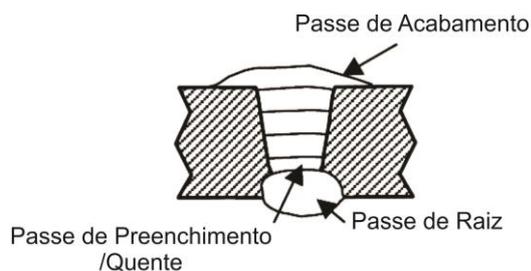


Figura 1 - Passes de soldagem

O passe de raiz é o primeiro e mais crítico da soldagem orbital, pois determina a velocidade de construção de uma linha dutoviária e é o mais propenso à defeitos. Este constitui a ligação primordial entre duas seções de tubo adjacentes. O passe quente é o primeiro passe de preenchimento e vem após o passe de raiz. Esse é aplicado com correntes baixas, logo a taxa de deposição de material também é baixa. Ele tem como finalidade conferir maior robustez a junta, para que os passes seguintes não perfurem o passe precedente e deve ser feito ainda “quente” para manter certa ductilidade da raiz, que é muito delgada. A vaporização de escória (*burning out*) encrustada nas bordas do cordão de solda, que não pode ser removida por escovação, e o reparo de pequenos defeitos do passe de raiz (falta de fusão e poros superficiais) é uma segunda função atribuída ao passe quente [2]. Após o passe quente, vêm os outros passes de preenchimento, os quais devem preencher completamente o chanfro. Nestes, altas taxas de deposição e velocidades de soldagem são permitidas, já que há um suporte espesso de material sob a poça de fusão. Com o chanfro devidamente preenchido a região soldada deve ser devidamente protegida, de modo que esta resista às intempéries do tempo.

## 1.1 Motivação

Na atualidade há uma demanda crescente por tecnologias aplicadas na construção de linhas dutoviárias de aço. Estas são usadas principalmente no transporte de óleo cru e seus derivados em longas distâncias, por ser o meio mais econômico de se transportar grandes volumes (frente a navios e caminhões tanque) [3]. De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia 2021 [4] a malha dutoviária brasileira contava em 2012 com 437 dutos, somando aproximadamente 7882 km. Ainda de acordo com o mesmo relatório até 2021 serão investidos somente pelo Grupo Petrobras US\$ 13,2 bilhões em navios, dutos e terminais. Uma pesquisa de mercado feita pela consultoria americana confirma os números acima. A Quest Offshore prevê que entre 2012 e 2017 serão construídos cerca de 8 mil km de dutos submarinos (*offshore*) no país, o que corresponderá a aproximadamente 19% do mercado mundial para o período, representando um aumento de 79% em relação aos anos compreendidos entre 2006 e 2011. Esses números expressivos se devem principalmente ao desenvolvimento de novos sistemas de produção no pré-sal na costa do Brasil [5]. Estes números podem ser considerados ainda mais expressivos se contabilizadas as construções *onshore*.

Nesse contexto surgem grandes desafios na construção de linhas dutoviárias, a qual tem ainda muito a melhorar em termos de Brasil. Espera-se que processos com controle de corrente, como o CCC (Curto Circuito Controlado) e STT, por resultados obtidos em trabalhos anteriores oriundos do Labsolda [6], produza uma junta mais robusta e de alta qualidade, ou seja, uma junta que permita a eliminação do passe quente do ponto de vista de robustez, conferindo maiores velocidades de construção de linhas dutoviárias e diminuindo refugos. Com o processo MIG/MAG Convencional, com uso de *backing* interno, também são esperadas maiores velocidades de construção dessas linhas. Isto porque o *backing* impede que o material de adição, ou poça de fusão, perfure o chanfro, pois a suporta. Sendo assim, é possível o uso de altas correntes de soldagem e altas taxas de deposição de material, que podem ser combinadas com altas velocidades de soldagem já no passe de raiz.

## 1.2 Objetivos

O presente trabalho visa à aquisição de conhecimento prático no que tange desde a preparação de um chanfro em um tubo, até a soldagem do passe de raiz sobre esse chanfro, concretizando a união de duas partes. As dificuldades encontradas, assim como outras informações, são reportadas nesse trabalho, enriquecendo assim o *know-how* do Labsolda nessa área estratégica para a expansão do setor energético brasileiro, já muito explorada pelo laboratório em outros trabalhos. Os resultados subsidiarão o programa de tecnologia em soldagem orbital do Labsolda, composto por diferentes linhas e projetos.

Dentro desse contexto, este trabalho tem como metas a qualificação dos processos MIG/MAG Convencional e STT para a soldagem orbital mecanizada, em duas partes (2x180°), de tubulações similares às utilizadas em linhas dutoviárias. Serão feitos experimentos para ambos os processos em um total de oito configurações básicas, assim como duas combinações extras, uma para cada processo de soldagem (STT e MIG/MAG Convencional). Serão testados arames de solda tipo ER70S-6 com diâmetro de 1,0 e 1,2 mm. Há também de se variar o tipo de junta: serão utilizados tubos chanfrados em “V” 30° e em “U”. Além desses, há de se variar de forma crescente o Gap (espaçamento entre dois tubos adjacentes) para o processo STT, de modo a se chegar a um *gap* mínimo que possibilite a realização do cordão de solda. Já para o processo MIG/MAG Convencional, como será utilizado um *backing*, o *gap* é zero. Em um dos testes extras, para uma configuração do processo STT escolhida, será utilizado o CO<sub>2</sub> puro como gás de proteção,

de modo a avaliar seu desempenho com este gás economicamente interessante (menor custo). Já no segundo experimento extra, para uma configuração do processo MIG/MAG Convencional escolhida, será verificada a possibilidade de uso de um *backing* de cerâmica. Isto por causa da maior aceitabilidade de processos que não usam um backing de cobre, devido a inclusões deste metal no cordão de solda.

Além da realização de experimentos, este trabalho tem outros objetivos:

- Construção de uma bancada que possibilite, dentro de seus limites, simular a soldagem como em campo;
- Construção de bancada para seccionar seções de tubo (500 mm de comprimento) em pedaços menores para a confecção de corpos de prova;
- Verificação das possíveis problemáticas encontradas na preparação de um chanfro de tubo;
- Aquisição de dados (corrente elétrica, diferença de potencial elétrico e velocidade de arame) durante a realização dos experimentos para avaliação dos mesmos;
- Preparação de macrografias da seção transversal nos cordões de solda adequados em três posições de soldagem (plana, vertical e sobre cabeça);
- Realização de radiografias nos cordões de solda adequados para avaliação dos mesmos pela Norma API 1104;
- Comparar e avaliar os resultados obtidos.

Sendo assim, espera-se ao final deste trabalho conhecer como cada um dos fatores abordados (processo de soldagem, tipo de junta, bitola de arame, gás de proteção e outros) interfere o processo e qual a melhor combinação deles, considerando os processos estudados separadamente, de modo a se obter um cordão de solda adequado segundo a Norma API 1104.

## 2 Fundamentação Teórica

---

Neste capítulo é feita uma revisão dos conhecimentos teóricos importantes para a realização do presente trabalho. São apresentadas, de forma simplificada, as etapas de construção de dutos terrestres e submarinos, de forma a garantir uma aproximação dos experimentos com a realidade. Em seguida, são demonstradas as técnicas e procedimentos adotados para a realização de passes de raiz em tubulações através do processo MIG/MAG Convencional e suas variantes, de forma mecanizada, de modo a justificar e esclarecer os motivos que levaram à escolha de alguns procedimentos. Além disto, outros processos, tradicionais e não convencionais, que podem ser adotados para unir as seções de dutos, são apresentados, de forma a expandir o horizonte do leitor. São também apresentados, agora de forma mais específica, os processos de soldagem, e funcionamento destes, aplicados neste trabalho: MIG/MAG Convencional e STT. Por último, uma revisão da Norma API 1104 é demonstrada, enaltecendo os critérios adotados para avaliação dos cordões de solda no presente trabalho.

### 2.1 União de Tubos

#### 2.1.1 Fabricação de Dutos Terrestres (*Onshore*)

A fabricação de dutos terrestres compreende algumas etapas, que vão além da soldagem [7]. Estas serão elucidadas nos parágrafos seguintes de modo a inserir o leitor no contexto do trabalho, permitindo assim uma maior noção das dificuldades encontradas nesse tipo de operação.

Primeiramente deve-se determinar uma faixa de domínio. Esta compreende a área de abertura da vala, que deve se localizar em uma das laterais da faixa, e instalação da tubulação. Ela deve visar o menor impacto ambiental possível e tem uma largura compreendida entre 15 e 20 m.

Em seguida a diretriz da vala deve ser traçada e sua abertura feita. A largura da vala varia conforme o diâmetro dos tubos e a sua profundidade é regida principalmente pelo tipo de terreno. Deve-se garantir a inexistência de matérias duros no fundo da vala que possam vir a danificar os tubos e/ou revestimentos.

Agora os tubos podem ser transportados, com cuidado, e distribuídos ao longo da faixa de domínio (Figura 2). Estes devem ser normalmente apoiados sobre sacos de terra ou de palha de arroz. Neste estágio, as curvas, devido a demanda geográfica do local,

devem ser identificadas para que os tubos possam posteriormente ser curvados em um equipamento denominado “curvadeira”. Os trechos de tubo sujeitos a alagamentos (brejos, travessias d’água e outros) devem ser revestidos com concreto de moda a garantir maior proteção e peso a tubulação.



Figura 2 - Tubos distribuídos ao longo da faixa de domínio

A próxima etapa compreende a montagem dos tubos, que nada mais é do que o acoplamento destes (normalmente com o auxílio de acopladores internos). Seguida a montagem vem a soldagem completa da junta, que caracteriza a união das seções de tubo. Nesta etapa se vê a importância do passe quente em relação ao aumento da seção resistente (espessura da solda), pois os tubos estão suportados por escoras e acopladeiras ou suportes (“cachorros”), que não são completamente rígidos.

O próximo passo compreende a inspeção das soldas. Com estas aprovadas, as junções devem ser revestidas com uma manta de polietileno. Feito isto as colunas podem ser abaixadas na vala (Figura 3). A próxima etapa compreender a soldagem dos “tie-ins”, que são os pontos de ligação entre duas colunas previamente lançadas. A soldagem dos “tie-ins” é uma operação crítica e é realizada sempre dentro da vala.



Figura 3 - Abaixamento das colunas

Terminadas estas etapas têm-se todos os tubos interconectados, porém há ainda algumas etapas que devem ser realizadas: proteção e restauração da faixa, limpeza da linha, teste hidrostático da tubulação, proteção catódica, revisão do projeto e condicionamento.

### 2.1.2 Fabricação de Dutos Submarinos (*Offshore*)

A fabricação de dutos submarinos é análoga à fabricação de dutos terrestres. A grande diferença entre os dois procedimentos está no ambiente em que a tubulação vai operar, no local onde é feita a fabricação e na forma com que esta é alojada. Além disto, o duto submarino deve ser totalmente revestido com uma manta, normalmente de polietileno ou polipropileno, para isolá-lo contra a água marinha. A fabricação destes, do modo convencional, se dá quase totalmente dentro de uma fábrica ou a bordo de uma embarcação, em uma linha de produção composta por diversas estações [7]. No caso da fabricação a bordo de uma embarcação, o movimento do barco torna o passe quente ainda mais crítico. Outro fator importante, ainda em relação à fabricação a bordo de uma embarcação, é o alto custo de aluguel dessas embarcações. Sendo assim, a soldagem orbital, por ser mais produtiva, garantiria economia as empresas contratantes.

Há basicamente três técnicas primárias para se lançar um duto ao mar: *S-lay*, *J-lay* e *Reel-lay*. Nos três casos o lançamento é feito por uma embarcação lançadora (Figura 4). Outras técnicas são *Bundle* e *Flex-lay*.

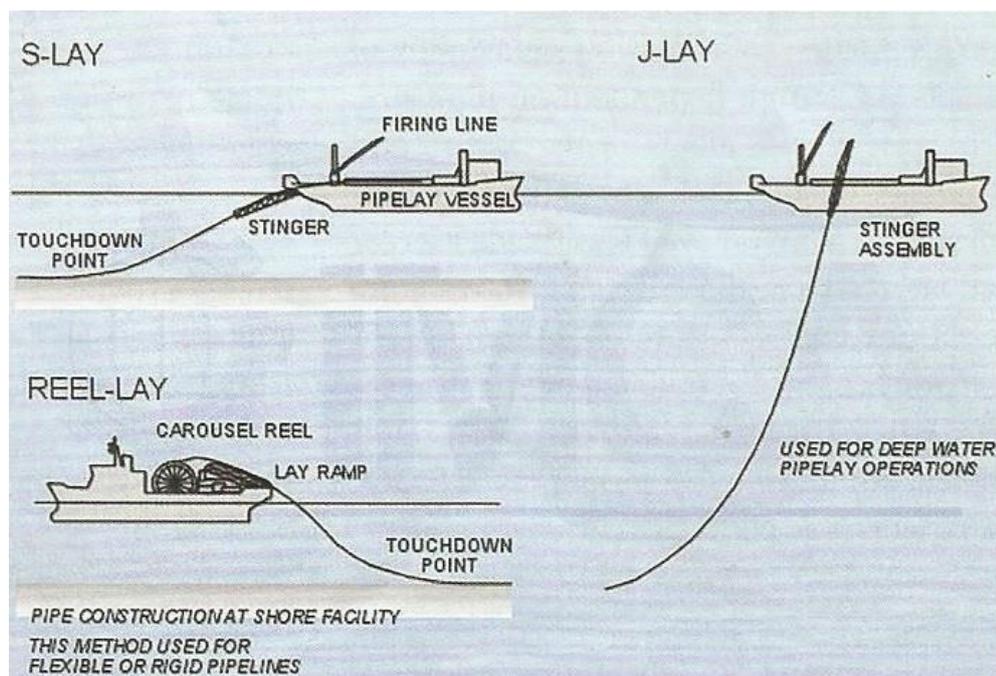


Figura 4 - Técnicas primárias de lançamento de dutos submarinos

Nos dois primeiros casos a fabricação do duto é feita a bordo da embarcação e no final da linha de produção depositada no fundo do mar. Já na técnica *Reel-lay* o duto é inteiramente fabricado em uma linha de produção em terra e posteriormente bobinado em um carretel a bordo do navio lançador. Dependendo do tipo e dimensão dos tubos, uma das técnicas primárias deve ser escolhida (Tabela 1) [8].

Técnica / Características	S-lay	J-lay	Reel-lay
<b>Diâmetro Duto</b>	203,2 – 1016 mm	203,2 – 762 mm	101,6 – 457,2 mm
<b>Tipo Tubo (Principalmente)</b>	Com costura	Com costura	Sem costura
<b>Velocidade Lançamento</b>	100 – 500 m/h	50 – 150 m/h	600 – 1000 m/h
<b>Aplicação</b>	Linhas de transporte longas	Linhas de transporte curtas ( <i>risers</i> )	Linhas de transporte longas

Tabela 1 - Técnicas primárias de lançamento de dutos submarinos e suas características

A fabricação de dutos elucidada nos parágrafos seguintes é baseada na técnica *Reel-lay* de lançamento. As etapas mencionadas podem, portanto, ser extrapoladas para as outras duas técnicas.

A primeira estação para a fabricação de dutos submarinos é responsável pela soldagem do passe de raiz e passe quente (Figura 5). Nesta, os tubos já chanfrados e com as extremidades preparadas que vêm de uma estação adjacente denominada *racks* de alimentação, são alinhados por meio de uma acopladora interna ou externa e soldados.



Figura 5 - Soldagem do passe de raiz e quente e *rack* de alimentação no primeiro plano

Feito isto, o duto é puxado por meio de uma guia até a próxima estação de soldagem, a qual responsável pelo primeiro passe de enchimento. Ao mesmo tempo o terceiro tubo, proveniente dos *racks* de alimentação adjacente, é rolado para a linha de produção, recomeçando a etapa de acoplamento ao duto. Este processo continua até que a junta, entre os tubos, seja completamente preenchida em “n” estações de soldagem.

Com o chanfro devidamente preenchido o duto é puxado até a próxima estação, onde é feita a inspeção visual da solda. Com a inspeção visual realizada o duto é novamente puxado até o *bunker* de radiografia ou ultrassom, onde as juntas soldadas são inspecionadas e imediatamente avaliadas conforme a norma regente. Eventualmente podem ser feitos reparos.

Novamente o duto é puxado até a estação onde as juntas são revestidas com uma manta termo contrátil, a qual há de proteger o duto do meio marinho. As juntas que necessitam de reparos não devem ser revestidas nesta estação. O processo continua até o duto saia do galpão. Nesta etapa ele é denominado *stalk* e tem geralmente entre 900 m e 1500 m de comprimento. Quando a última junta tiver sido revestida o *stalk* é rolado até os *racks* externos e posteriormente levado, por meio de guindastes, até os *racks* de estocagem (Figura 6), onde fica armazenado até a chegada de um navio lançador. Reparos e revestimento das juntas defeituosas são feitos nos *racks* de estocagem.



Figura 6 - Racks externos e racks de estocagem dos stalks

Quando um navio lançador atracar, o primeiro *stalk* é bobinado, por meio de roletes, até a estação de *tie-in* (Figura 7, b) e em seguida até a popa do navio. Nesta etapa o tubo é bobinado em um carretel (Figura 7, a) até que a extremidade do primeiro final *stalk* esteja localizada na estação de *tie-in*. Nesta, o segundo *stalk*, proveniente dos racks de estocagem, é acoplado com o primeiro e soldado. Também nesta estação são realizados os ensaios não destrutivos e o revestimento da junta. Feito isto o duto pode continuar sendo bobinado até que o número de *stalks* desejados esteja no carretel.

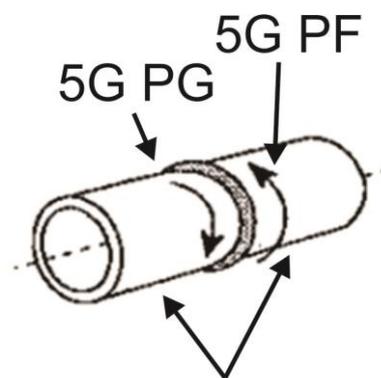


Figura 7 - a) Carretel a bordo do navio de lançamento; b) Estação *tie-in*

O navio pode então zarpar, com até 15 km de duto, para o local denominado para o lançamento. O duto tem então flanges soldados em suas extremidades e é lançado ao mar, pela técnica *Reel-lay*, por meio de um endireitador posicionado na vertical. Estes servem para acoplar o duto aos PLETs (*Pipeline End Terminator*), os quais interligam os dutos submarinos.

### 2.1.3 Passe de Raiz Mecanizado por MIG/MAG Convencional e Suas Variantes

Apesar de no Brasil a soldagem com eletrodo revestido ainda ser extensivamente aplicada para a união de dutos, a soldagem orbital, 5G PG ou PF (Figura 8), com MIG/MAG mecanizado tem sido utilizada nos últimos quarenta anos na construção de linhas dutoviárias fora do Brasil. Uma das maiores construções recentes (1999), que comprovou a eficácia da soldagem mecanizada, foi a “Alliance Pipeline”, que cruzou o Canadá e os EUA. Durante este projeto a soldagem mecanizada possibilitou soldagens três vezes mais rápidas do que as executadas pelo processo SMAW e o passe de raiz foi feito internamente [9].



## Tubos Estacionários

Figura 8 - Posição de soldagem 5G PG e PF

Os motivos que levaram este processo e suas variantes ao êxito são vários. Primeiramente trata-se de um processo facilmente mecanizado/automatizado, o que traz as seguintes vantagens [1]:

- Aumento de produtividade;
- Maior qualidade das juntas soldadas. Repetibilidade e confiabilidade;
- Diminuição da dependência de soldadores experientes (49% dos custos de uma linha dutoviária *onshore* é destinada a mão de obra em média).

O que motiva as companhias a buscarem um processo mecanizado/automatizado é o fato de elas quererem manter ou aumentar sua fatia de mercado. A alta produtividade do processo mecanizado/automatizado é intensificada pelas altas taxas de deposição de material permitidas pelo processo, o que minimiza as operações críticas de soldagem (passe de raiz) e aumenta a velocidade de construção da linha dutoviária, visto que a velocidade de soldagem do passe de raiz governa, de forma relevante, a produtividade da construção da linha [2].

A reprodutibilidade dos parâmetros de soldagem, especialmente para os processos especiais com controle imposto pela corrente (STT, FastROOT, EWM coldArc, CCC e outros), permite estabilidade do arco e redução do aporte térmico. Estes últimos, de acordo com algumas fontes, no caso dos processos especiais mencionados anteriormente. Kah [10] verificou em seu trabalho um menor aporte térmico para o processo FastROOT em relação ao MIG/MAG Convencional. Em seus experimentos comparativos foram mantidas a velocidade de alimentação de arame e velocidade de soldagem constante para ambos os processos. No entanto, em seus cálculos foram consideradas que as eficiências de ambos os processos são iguais, o que não é verídico. Já Silva [11], em sua dissertação de mestrado, observou também experimentalmente uma menor potência média para o processo CCC do Labsolda em relação ao MIG/MAG Convencional. Foi ressaltado, no entanto, que esta não é tão inferior como mencionado em algumas fontes literárias. Para fins de comparação foram mantidas as velocidades de soldagem, velocidades de alimentação de arame e diâmetros médios de gota constantes nos experimentos. Pode-se ainda observar no comparativo feito por Silva uma menor potência instantânea na fase de curto circuito para o processo CCC (Figura 9). Isto é explicado do ponto de vista que após a formação da gota a corrente é controlada, mantida em patamares baixos, de modo a evitar o sobreaquecimento da gota, respingos e teoricamente o calor transferido para a peça. Uma maior potência na reignição do arco também contribui para maior quantidade de respingos [12].

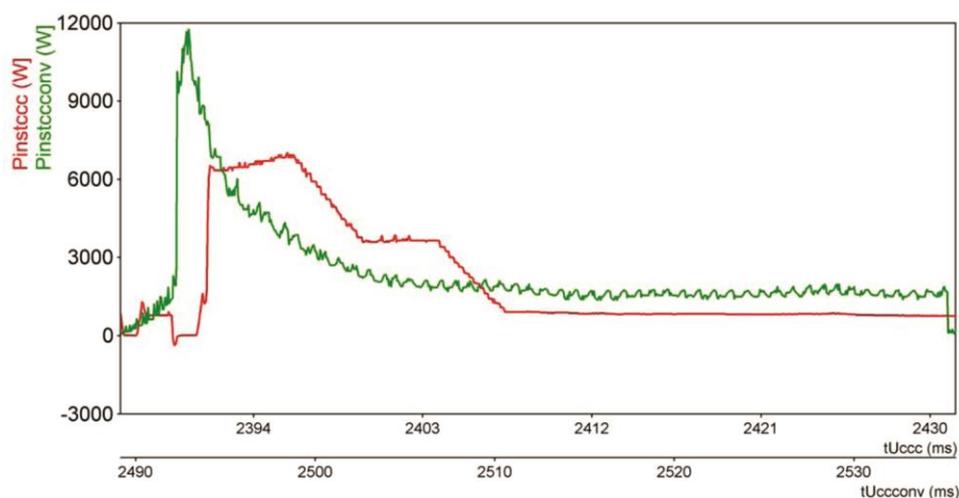


Figura 9 - Potência instantânea dos processos CCC e MIG/MAG Convencional

A possibilidade de se obter um menor aporte térmico pelos processos especiais de curto circuito controlado é de extrema importância quando aços ligados de alta resistência

da nova geração (X100, Duplex e outros) são soldados. Isto porque seus elementos de liga podem sublimar facilmente, resultando em perda das propriedades mecânicas quando os parâmetros ajustados ultrapassam os limites estritos impostos por estes [1].

A mecanização do procedimento possui também suas limitações, as duas principais são [1]:

- Preparação das juntas do tubo;
- Limites econômicos.

As tolerâncias de chanfro e alinhamento dos tubos devem ser precisamente determinadas, visto que são necessárias tolerâncias mais estreitas do que as aceitáveis em processos de soldagem manual. O principal limitante econômico é o número de uniões a serem realizadas. Quanto maior for o diâmetro e espessura de uma tubulação, menor será o número de uniões e tempo para que os investimentos feitos na mecanização/automação do processo tenham retorno (Tabela 2) [1]. Apesar de os tempos de soldagem apresentados na tabela parecerem exagerados, esta serve para se ter noção no ganho de produtividade com a aplicação de um procedimento mecanizado.

<b>Diâmetro e Espessura Tubo (Chanfro V) - Aço Carbono</b>	<b>Tempo Soldagem (SMAW)</b>	<b>Tempo de soldagem (MIG/MAG Orbital)</b>	<b>Número de Uniões para Retorno Financeiro</b>	<b>Tempo para Retorno Financeiro (35 h/semana)</b>
168 x 10 mm	1,5 h	0,6 h	2700	1 ano
273 x 20 mm	6 h	1,8 h	580	0,7 anos
508 x 25 mm	16 h	4 h	200	0,5 anos

Tabela 2 - Tempo e número de soldas para obtenção do retorno financeiro

Ou seja, não é interessante financeiramente, em médio prazo, a mecanização do processo caso poucas soldas venham a ser realizadas (montagem de componentes, pequenas linhas dutoviárias industriais e outros) a não ser que ela seja justificada pela escassez de mão de obra qualificada.

A soldagem orbital por MIG/MAG Convencional e por suas variantes com controle imposto pela corrente pode ainda ser feita de diferentes formas no que tange: tipo de junta, presença ou não de backing, posição de soldagem (5G PF ou PG) e tipo de gás de proteção.

Normalmente faz-se o uso de dois tipos de junta na união de dutos: “V” ou “U” (Figura 10). De acordo com um artigo da Polysoude [1] cada uma dessas preparações possui vantagens e restrições.

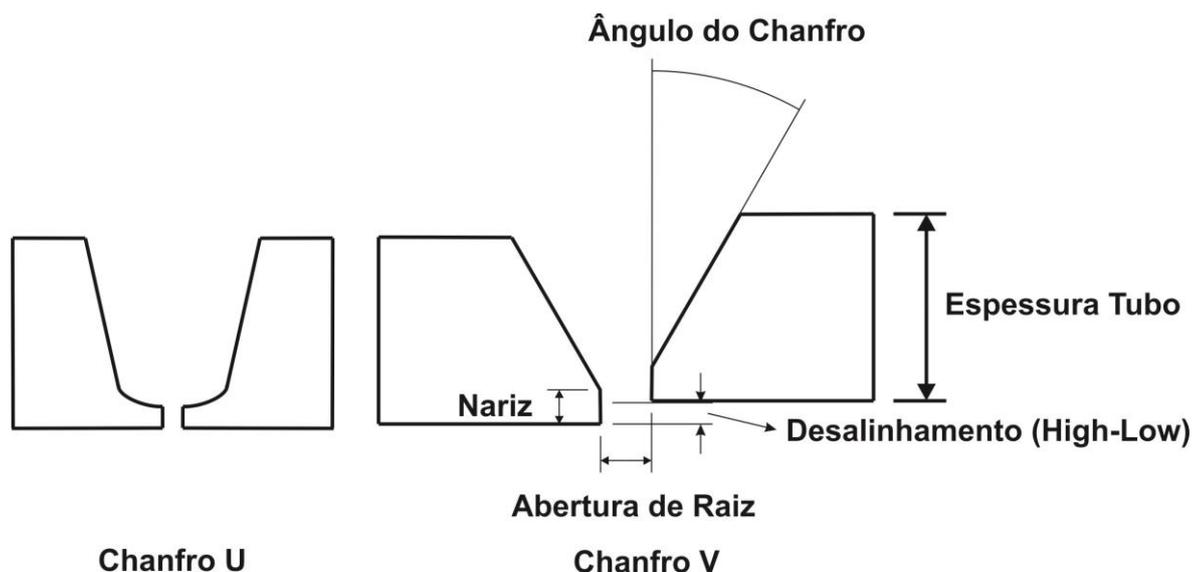


Figura 10 - Chanfro "U" e "V" e suas denominações

A junta em “U” reduz a quantidade de material depositada no chanfro para tubos com parede acima de 10 mm. Não são mencionados, no entanto, as dimensões de espessura de nariz e ângulo de abertura dos chanfros utilizados para se fazer tal comparação, o que poderia afetar consideravelmente as conclusões. A junta em “U” permite ser soldada pelos processos MIG/MAG e TIG, enquanto que a junta em “V” permite também o processo SMAW. Ainda de acordo com a mesma fonte, o chanfro em “U”, possibilita maiores velocidades de soldagem. Isto é compreensível visto que a extremidade do chanfro “U” (região próxima ao nariz) é menos robusta do que a extremidade do chanfro “V”, onde há mais material e é necessário, portanto, mais energia para fundi-la (Figura 10). Um inconveniente deste tipo de chanfro é que ele precisa ser usinado em campo, visto que os dutos são entregues chanfrados em “V”. Isto é verdade, porém não significa que o chanfro em “V” não precise ser usinado ou retrabalhado em campo. Isto porque se os dutos são entregues chanfrados em “V” 30° e o procedimento utilizado indica um chanfro “V” 60°, o chanfro terá que ser usinado novamente. E mesmo que estes sejam entregues com as dimensões desejadas, os seus chanfros muito provavelmente necessitarão de retrabalho, esmerilhamento, para remover a superfície oxidada destes.

Ainda no que concerne a junta, a sua soldagem pode ser feita com ou sem um *backing* interno (Figura 11), que nada mais é do que um suporte que impede que o arame e/ou poça de fusão perfure o chanfro.

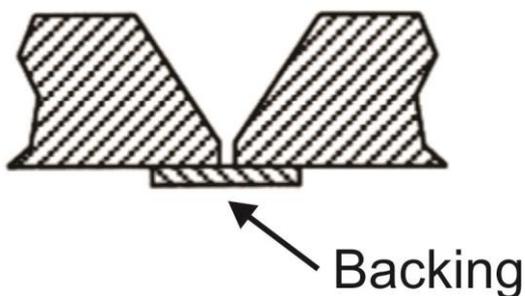


Figura 11 - Esquema posição do *backing*

O *backing* fica em contato direto com a superfície inferior da poça de fusão durante o processo de soldagem do passe de raiz. O uso de *backings* implica em altas velocidades de soldagem, não podendo ser superado [1]. Isto é plausível do ponto de vista que não há preocupação com a perfuração do chanfro pela poça de fusão, haja vista que o *backing* sustenta a poça, e com isso altas correntes de soldagem (altas velocidades de arame) são admissíveis e a produtividade é, portanto, aumentada. Há basicamente dois tipos de *backings* (que serão explorados neste trabalho): *backing* de cobre e de cerâmica. Sendo que o primeiro é mais amplamente empregado. O uso de um *backing* de cobre traz, no entanto, o risco de inclusões de cobre no cordão de solda, o que pode não ser admissível para algumas aplicações por parte de empreiteiras (normalmente não admissível na Europa) devido aos problemas que podem ser causados por elas [13]. O seu uso também implica em maior custo, já que acopladoras internas de tubo com *backing* de cobre (Figura 12) tem seu preço cerca de 70% maior do que acopladoras internas sem o *backing*, devido principalmente ao custo do cobre e ao mecanismo adicional de encaixe do mesmo. Além disto, há de se considerar o alto custo de troca do *backing*, já que se trata de um consumível do processo.

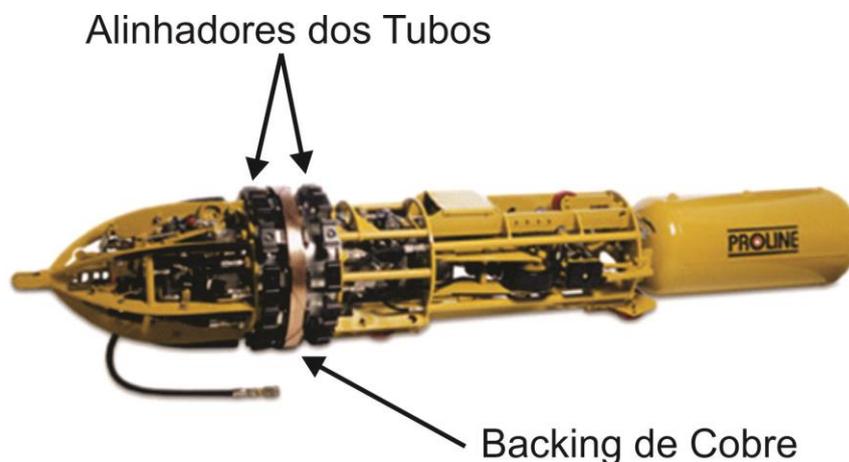


Figura 12 - Acopladeira interna de tubos com *backing* de cobre

Há também a opção de se usar um *backing* de cerâmica. Este elimina o problema de inclusões. No entanto, não há atualmente no mercado um sistema que o aplique em conjunto com uma acopladora interna. Ainda vale ressaltar que não é estritamente necessário o uso de uma acopladora interna de tubos. Outros sistemas mais simples podem ser adotados. Estes, no entanto, podem interferir negativamente na produtividade.

Já a posição de soldagem aplicada na soldagem do passe de raiz para a união de tubos, pode ser feita de duas maneiras: 5G PG (descendente) ou PF (ascendente). Muitos dos processos referenciados na bibliografia [1,14,15,16,6] usam a posição descendente para a realização do passe de raiz, mas não há uma justificativa explícita em todos eles para o seu uso em detrimento da posição ascendente. Observando os parâmetros de soldagem para o processo TIG alimentado utilizados por Renelt [15] na ascendente e descendente, pode-se concluir que as velocidades de soldagem são maiores para a soldagem na vertical descendente em chapas planas. O artigo de Beeson [16] menciona uma menor produtividade associada à soldagem na ascendente, mas não a justifica. Em seu artigo é descrito o procedimento adotado por uma das empreiteiras responsáveis pela construção da “Alliance Pipeline”. Neste caso o passe de raiz foi soldado internamente, simultaneamente por seis manipuladores, na posição vertical descendente. Já de acordo com o trabalho realizado por Direne [6] a escolha da posição descendente, em detrimento da ascendente, para a realização de seus experimentos se deve a fatores geométricos do cordão de solda e sustentação da poça de fusão. Segundo o mesmo artigo, na soldagem na descendente os cordões de solda para os processos STT e CCC do Labsolda (Curto Circuito Controlado) apresentaram maior convexidade na parte superior do cordão, assim como maior reforço na raiz. Já as tentativas em se soldar na ascendente com o MIG/MAG Convencional foram frustradas. A facilidade em se soldar na descendente foi então atribuída à posição relativa entre poça de fusão e o arame, a qual pode ser visualizada por intermédio de filmagem em alta velocidade (Figura 13). No caso da soldagem descendente o arame tende a sustentar a poça, ao contrário da soldagem na ascendente, onde o arame tende a jogar o material para fora da poça.

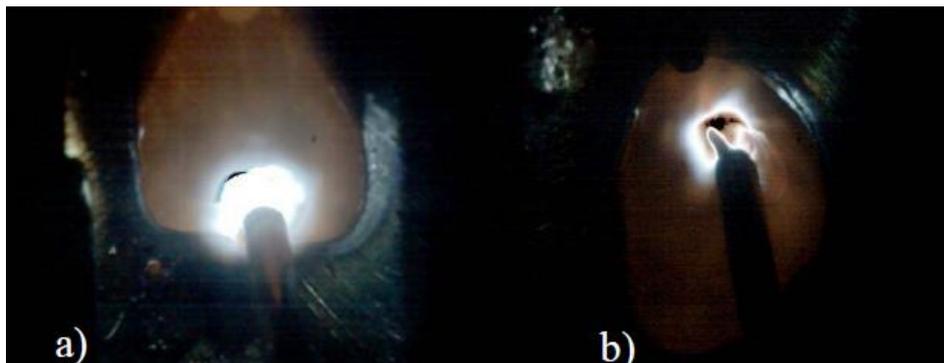


Figura 13 - a) Soldagem na descendente b) Soldagem na ascendente

Em relação aos gases de proteção, diferentes combinações podem ser usadas. No presente trabalho foram explorados o  $\text{CO}_2$  puro e o C25 (75% Ar + 25%  $\text{CO}_2$ ). O uso de  $\text{CO}_2$  implica em uma penetração mais larga e profunda e em menor custo, que apesar de ser pequeno, em média 5% do custo típico da soldagem de aços, pode ser consideravelmente alta em grandes instalações [16]. A melhor penetração se deve à sua alta condutividade térmica, maior do que a do Ar [17]. A soldagem com este gás é dita dificultosa devido à instabilidade do arco e pela maior produção de salpicagem. Isto, no entanto, é parcialmente verdadeiro e acontece com maior intensidade quando a regulagem fonte de soldagem não atende as características físicas do arco [18]. Já o gás C25 possibilita a transferência metálica por spray, assim como um arco voltaico mais facilmente controlado.

Com o passe de raiz devidamente executado, através de uma combinação das variáveis e técnicas mencionadas acima, se deve executar o passe quente (ou não) e os de preenchimento, de modo a concretizar a união da junta.

#### 2.1.4 Outras Técnicas de União de Dutos

Além do MIG/MAG Convencional e suas variantes, há disponível no mercado outros processos que possibilitam a execução do passe de raiz e/ou completa união da junta.

Primeiramente tem-se o processo SMAW (Figura 14). Este ainda é muito utilizado, apesar da baixa produtividade, devido a alguns fatores [6]. Baixo custo de equipamento e de produção, além da facilidade de deslocamento de seu equipamento, por ser compacto, são alguns dos motivos que ainda fazem muitas empresas optarem por este processo. No entanto ele vem caindo no desuso devido a incapacidade de automatização (alta dependência mão de obra qualificada), baixas velocidades de soldagem e descontinuidades contidas nos cordões (escórias). Outra desvantagem deste processo, no que tange a

soldagem de aços de alta resistência (em crescimento no mercado), é o fato de eles não permitirem baixos níveis de hidrogênio difusível no metal de solda, o que propicia o aparecimento de trincas nestes metais especiais. Os eletrodos revestidos com baixo teor de hidrogênio foram desenvolvidos para a realização de soldagens na ascendente, o que reduz, em tese, a velocidade de soldagem e, portanto, a produtividade deste processo mais ainda [19].



Figura 14 - Soldagem orbital de com SMAW

Uma alternativa para o passe de raiz é a soldagem TIG alimentada com arame (Figura 15). Esta permite basicamente alta qualidade do cordão de solda, tanto no que tange a sua geometria quanto no que tange as propriedades mecânicas do cordão. Suas desvantagens são a alta sensibilidade do processo ao meio externo e a sua velocidade de soldagem limitada pelo efeito *humping* [6]. Além disto, o passe de raiz executado com TIG tende a ser menos robusto que o executado por outros processos. Renelt [15] concluiu que o processo TIG possibilita a execução de um passe de raiz mais rapidamente do que os processos MAG e SMAW. A metodologia adotada para esta comparação é, no entanto, curiosa. No comparativo foram considerados, além do tempo de execução do passe de raiz, os tempos para a vaporização da escória contida nos cordões MAG e SMAW (passe quente) e o tempo para a soldagem do passe de acabamento (*welding cap run*). Para a soldagem SMAW ainda foi considerado o tempo de remoção de escória. Já para a soldagem TIG, o único tempo contabilizado foi o da execução do passe de raiz. No comparativo não foi também levado em conta a quantidade de material depositada pelos processos, o que pode tornar um processo mais lento que deposita mais material não necessariamente menos produtivo, do que um processo mais rápido que deposita menos material, visto que uma menor quantidade de material seria necessária para preencher o restante do chanfro para o primeiro caso.

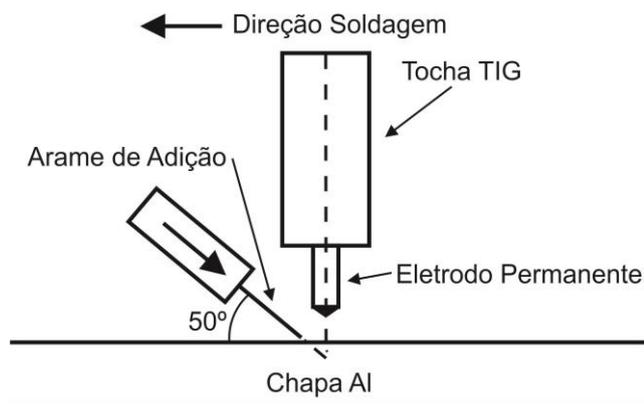


Figura 15 - TIG mecanizado com alimentação de arame

Nos últimos anos, e também na atualidade, outros processos além dos ditos “tradicionais” mencionados acima, foram e têm sido desenvolvidos com o intuito de aumentar a produtividade na construção de linhas dutoviárias: soldagem a laser, soldagem *flash butt* e soldagem homopolar. Apesar de algumas das técnicas acima terem sido aplicadas com sucesso, estas não tiveram uma boa aceitação e não foram capazes de superar os processos MIG/MAG [20].

Há registros de soldagem a laser de  $\text{CO}_2$  com adição de material realizada com sucesso pela empresa Bouyges Offshore em uma linha dutoviária. A empresa desenvolveu equipamento de 12 kW que foi utilizado em campo para a soldagem de seis seções de 0,5 km de dutos API 5L X52. Um protótipo de equipamento de soldagem de 20 kW também foi desenvolvido pela empresa francesa AXAL, este para a soldagem de dutos em uma embarcação de lançamento de dutos pela técnica *J-lay*. Este processo possui, no entanto, uma grande desvantagem. Devido ao comprimento de onda do seu feixe ( $10,6 \mu\text{m}$ ), este não pode ser transmitido por meio de lentes. Sendo assim, são necessários uma série de espelhos para a transmissão deste, o que dificulta a soldagem circunferencial ou em geometrias complexas.

Esta desvantagem é superada por outro tipo de laser: o Nd:YAG. Neste caso o comprimento de onda do feixe é menor ( $1,06 \mu\text{m}$ ), o que permite que este seja transmitido por lentes. Isto possibilita a fácil automação do processo de soldagem para geometrias complexas e em altas velocidades. Um projeto conjunto entre três instituições, Cranfield, EWI (*Edison Welding Institute*) e TWI (*The Welding Institute*), denominado “YAGPIPE” investigou o potencial de soldagem a laser em tubulações. Pode ser constatado que um processo híbrido de soldagem “Laser Nd:YAG - MIG/MAG” tem potencial para aumentar a produtividade da soldagem do passe de raiz. Foi possível obter raízes com espessura de 3

mm à uma velocidade de soldagem de até 3,5 m/min com um laser de 6 kW (Figura 16). Este processo, no entanto, possui um grande entrave: baixa eficiência energética. O seu uso em aplicações *onshore* torna-se então inviável, devido a demanda energética, espaço físico e necessidade de refrigeração do sistema.

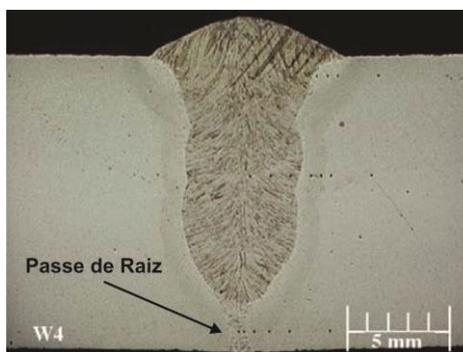


Figura 16 - Passe de raiz executado com “Laser Nd:YAG - MIG/MAG” e enchimento com MIG/MAG de alta produtividade

A soldagem *flash butt* (Figura 17) foi desenvolvida na União Soviética pelo Instituto de Soldagem Paton e muitas das linhas dutoviárias *onshore* russas e ucranianas foram unidas por este processo. Este processo é inclusive aceito pela Norma API 1104 e apesar de ter sido licenciado pela empresa americana McDermott, nunca foi utilizado pela mesma para construção de linhas dutoviárias. O desenvolvimento de sistemas de soldagem convencional e a incapacidade de se obter propriedades mecânicas satisfatórias pelo processo limitaram a sua aplicação. Experimentos executados pela Statoil, em tubos de 914,4 mm de diâmetro (36 in), demandaram ciclos de aquecimento e tempera de cerca de 6,5 minutos.



Figura 17 - Soldagem *Flash Butt*

A soldagem homopolar é um processo por resistência, o qual opera com o mesmo princípio da soldagem por indução. Neste processo um gerador é utilizado para entregar um pulso elevando de corrente contínua (DC). A operação de soldagem dura entre 2 e 3 segundos e conseqüentemente a zona termicamente afetada (ZTA) é pequena. Durante a

operação os tubos devem ser pressionados uns contra os outros, de forma a garantir a união. Até meados de 2004 o processo estava sendo pesquisado na Universidade do Texas, mas o projeto foi cancelado devido a constatação de que um alto capital financeiro seria necessário para torná-lo comercialmente viável.

Há ainda outros processos e maneira diferentes de executá-los, além dos citados anteriormente como alternativa ao MIG/MAG, os quais não poderiam ser plenamente explicados neste texto.

## **2.2 Fundamentos dos Processos de Soldagem Abordados**

### **2.2.1 MIG/MAG Convencional Por Curto Circuito**

O processo MIG/MAG Convencional é por definição um processo de soldagem a arco elétrico no qual o material de adição em forma de arame, sólido ou tubular, é alimentado continuamente. O seu conceito básico surgiu na década de 20, mas foi só em 1948, após os avanços promovidos pela 2ª guerra mundial, que ele se tornou viável comercialmente. Ele pode ser aplicado tanto manualmente como de forma mecanizada/automatizada, em todos os metais comercialmente importantes (aços carbono, aços inoxidáveis, alumínio, cobre e outros) e em todas as posições de soldagem, se escolhidos parâmetros e consumíveis adequados. A maioria das características aqui descritas vão de acordo com o *Welding Handbook* [21].

Dentre as vantagens gerais do processo, além das citadas anteriormente, temos:

- Altas taxas de deposição (processo semiautomático e alta densidade de corrente);
- Alto fator de trabalho (alimentação de arame contínua, poucas paradas e reinícios de solda);
- Ausência de escória significativa (redução do trabalho pós-soldagem).

Mas há também limitações. Algumas são:

- Equipamento de soldagem complexo quando comparado ao utilizado para o processo SMAW;
- Arco voltaico deve ser protegido de correntes de ar (dispersão do gás de proteção).

O processo incorpora alguns equipamentos básicos para o seu funcionamento (Figura 18):

- Fonte de soldagem de tensão constante;
- Unidade de refrigeração para a tocha (pode ou não ser incorporada na fonte);

- Tocha de soldagem com guia para o arame de adição e contato elétrico com a fonte;
- Cabeçote de alimentação de arame e rolo de arame;
- Cilindro de gás, o qual pode conter uma mistura ou não de gases inertes (Ar, He e outros.) e/ou ativos CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> e outros.

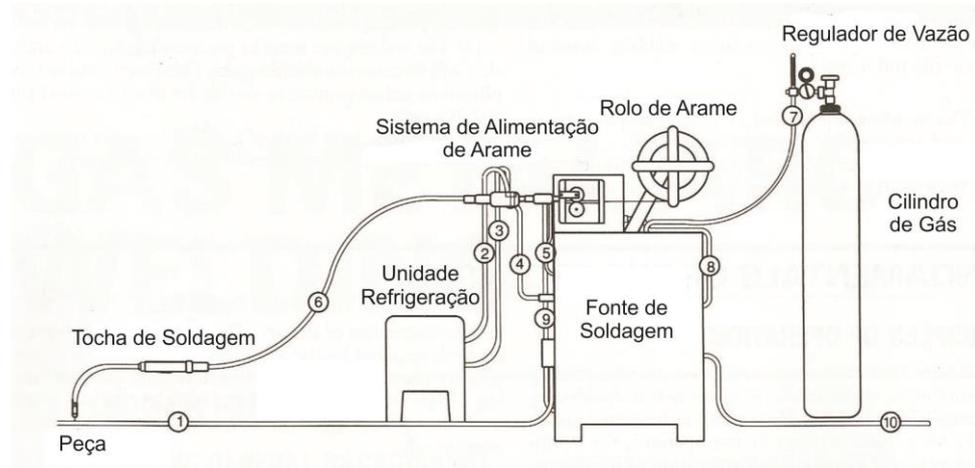


Figura 18 - Equipamentos básicos para o processo MIG/MAG Convencional

O processo, quando iniciado, alimenta o arame por meio de um sistema de alimentação provido de roletes. Esse arame é direcionado por uma guia (6) até a tocha de soldagem e ao sair pelo bico de contato, e entrar em contato com a superfície da peça, um arco elétrico é formado (Figura 19). Este permite a fusão do material de adição e material base (peça), de modo a concretizar o processo de soldagem, e é protegido por uma atmosfera gasosa (gás de proteção). No presente caso, e na maioria das aplicações, a polaridade do eletrodo é positiva (polaridade inversa) e a da peça negativa. A polaridade inversa é a mais utilizada, pois permite uma maior estabilidade do arco voltaico, transferência metálica mais suave, menor quantidade de respingos, boas características geométricas do cordão de solda e outras vantagens. A polaridade direta tem aplicação somente em casos de revestimento de superfície, devido às altas taxas de deposição e baixas taxas de diluição alcançadas.

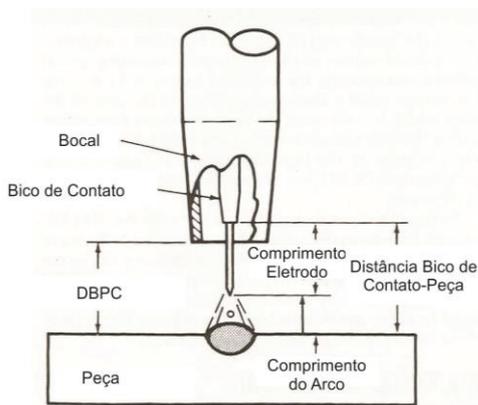


Figura 19 - Esquema da dinâmica do processo durante a soldagem

Antes de iniciar o processo, é necessário, no entanto, programar a fonte de soldagem com os parâmetros adequados. De forma generalizada, podemos dizer que são três os parâmetros: velocidade de alimentação de arame, tensão elétrica do arco e indutância de subida e descida da corrente ( $K_s$  e  $K_d$ ).

A velocidade de alimentação de arame tem uma atuação diretamente proporcional à corrente de soldagem. Se mantida uma diferença de potencial constante, um aumento da velocidade de alimentação acarretará em um aumento da corrente elétrica e diminuição do comprimento do arco elétrico (Figura 20).

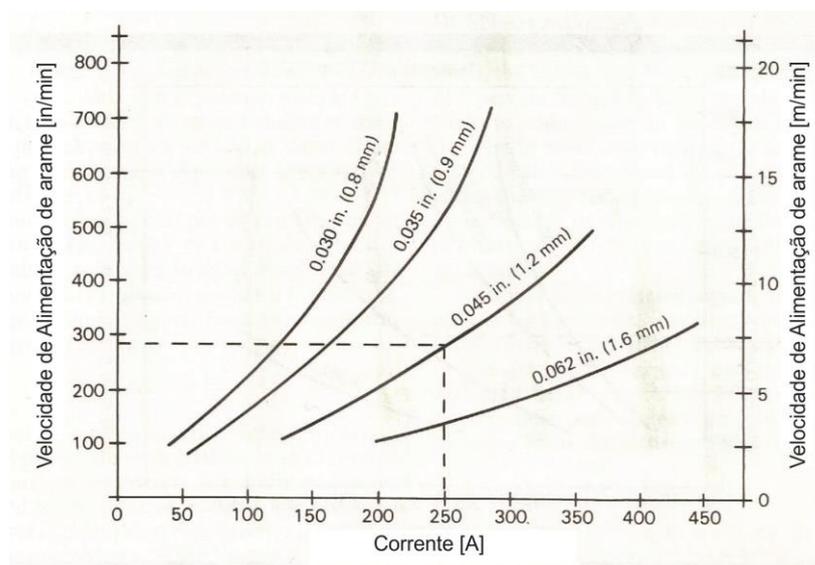


Figura 20 - Corrente de soldagem em função da velocidade de arame

Há ainda a influência do comprimento sólido de arame (*stick out*), compreendido entre o bico de contato da tocha e a parte superior da coluna do arco voltaico, sobre a corrente de soldagem. Quanto maior for o *stick out*, maior é a geração de calor ao longo da

extensão sólida por efeito Joule e maior é a resistência imposta a corrente de soldagem, o que resulta em um decréscimo da corrente de soldagem e vice-versa.

Já a tensão elétrica do arco pouco influencia na corrente de soldagem e é mantida, dentro do possível, constante durante o processo pela fonte de soldagem de tensão constante. A tensão elétrica influencia de maneira mais atuante na forma do arco voltaico e representa de certa forma o comprimento do mesmo. Para uma velocidade de alimentação de arame constante, por exemplo, um aumento da tensão elétrica acarreta em um aumento do comprimento da coluna do arco, aumentando sensivelmente a potência do arco e diminuindo de forma também sensível, e quase imperceptível na maioria das vezes, a velocidade de alimentação de arame. Isto devido a perdas de calor para o meio externo, promovidas ao longo da coluna do arco.

A indutância influencia na taxa de subida e descida da corrente de soldagem (Figura 21) e pode ser ajustada separadamente para ambos os casos. De acordo com Dutra [18] a taxa de subida da corrente, na transferência por curto circuito (será abordado adiante), pouco influi na qualidade dos cordões de solda com um ou outro gás de proteção ( $C_{25}$  e  $CO_2$ ) e um valor de 60 A/ms satisfaz genericamente ambos os casos. Já a taxa de descida da corrente é de grande importância para a estabilidade do processo e seu aumento resulta em maior frequência de ocorrência de curto circuito, o que reflete em menores diâmetros de gota (diâmetros próximos ao diâmetro da bitola do arame favorecem a estabilidade do processo) e, portanto, na estabilidade do processo. A taxa de descida, ainda de acordo com Dutra, deve ser de duas a quatro vezes menor do que a de subida.

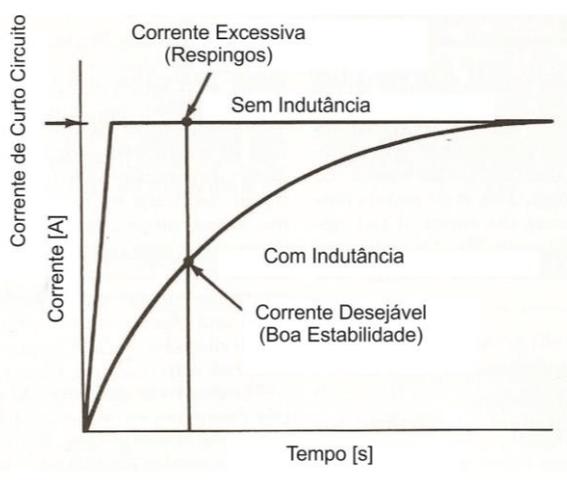


Figura 21 - Efeito da indutância sobre a corrente de soldagem

Para tornar possível a união das aberturas de raiz das seções de tubo fora de posição (5G PG ou PF), sem escorrimento do material de adição, é necessário trabalhar com a

transferência metálica por curto circuito. Isto porque esta transferência está associada com pequenas poças de fusão que esfriam rapidamente, devido ao baixo aporte de calor. Há ainda, de forma generalizada, outros tipos de transferência metálica que não serão abordados neste trabalho. Alguns tipos de transferência podem ser observados na Figura 22. O tipo de transferência é determinado por diversos fatores, dentre os quais se destacam:

- Magnitude e tipo de corrente utilizada (polaridade direta ou inversa);
- Diâmetro, composição e extensão livre do eletrodo;
- Gás de proteção.

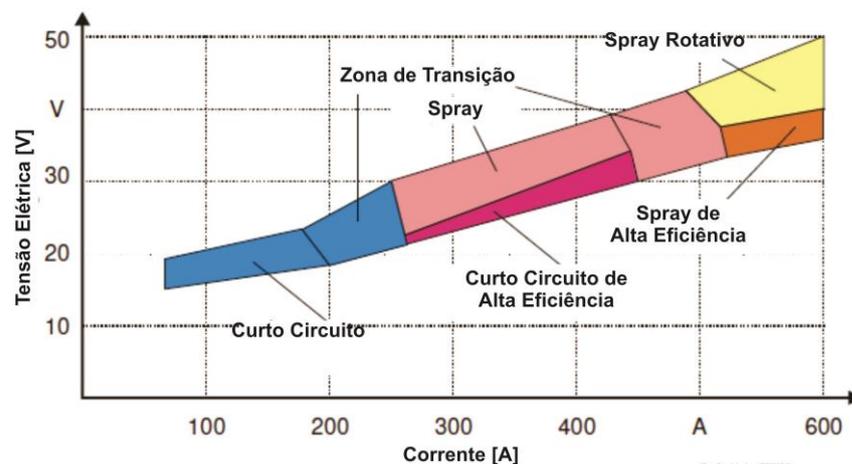


Figura 22 - Modos de transferência metálica para arame de 1,2 mm e gás de proteção Ar/He/Co<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> - 65/26,5/8/0,5

A transferência metálica por curto circuito se caracteriza pelo contato entre a gota líquida formada na extremidade do arame-eletrodo e a poça de fusão. A transferência de material se dá, portanto, durante o período em que o eletrodo está em contato com a poça de fusão, ou seja, durante o período em que o circuito está fechado. Observando a Figura 23 fica clara a sequência de eventos relacionada com essa transferência.

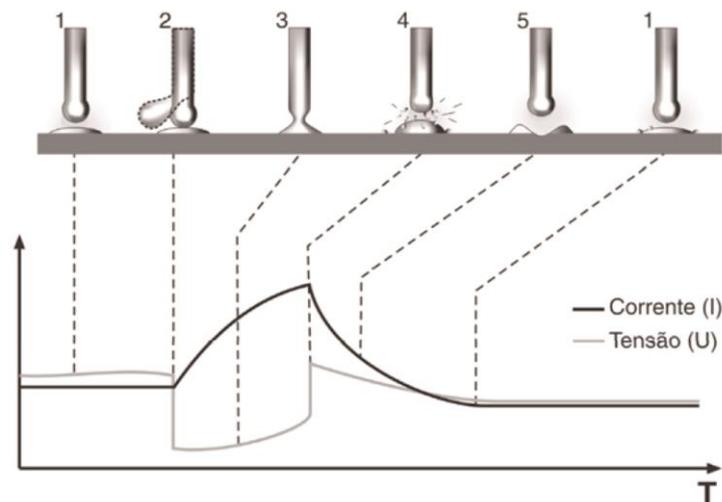


Figura 23 - Transferência metálica por curto circuito para o processo MIG/MAG Convencional

Primeiramente o eletrodo, com sua extremidade fundida, toca a poça de fusão. Durante o contato a corrente cresce, ao contrário da diferença de potencial elétrico que decresce, até que a gota formada na ponta do eletrodo é estrangulada pelo Efeito Pinch e se destaca. Após o destacamento o arco é reaberto e a corrente decresce mais uma vez, com o aumento da diferença de potencial elétrico até a sua estabilização no valor programado na fonte. Novamente o material na ponta do eletrodo é parcialmente fundido até entrar em contato com a poça de fusão e reiniciar o ciclo. Aqui vale ressaltar que a taxa de crescimento da corrente (indutância) deve ser grande o suficiente para aquecer o eletrodo e destacar a gota metálica, mas também não muito elevada, de modo a minimizar respingos provenientes da separação violenta da gota do eletrodo [18,22].

Além das variáveis de processo programáveis na fonte de soldagem, também são variáveis do processo: a DBCP (distância bico-peça), a qual é proporcional a extensão do eletrodo, a velocidade de soldagem, a qual é a velocidade com a qual se desloca a tocha, o tipo de gás de proteção utilizado e a orientação do eletrodo, a qual pode ser perpendicular ou oblíqua (puxando ou empurrando) a peça.

### 2.2.2 *Surface Tension Transfer (STT)*

O processo de soldagem STT, *Surface Tension Transfer*, é análogo ao processo MIG/MAG Convencional. Todo o equipamento, com exceção da fonte de soldagem, é similar, assim como o funcionamento, com exceção da variável de controle, que é a corrente e tem como função controlar ativamente a transferência metálica. Ele surgiu no início da década de 90 como um processo com transferência metálica por curto circuito

com a promessa de reduzir respingos, manter a estabilidade do processo, reduzir a emissão de fumos de soldagem, mesmo quando utilizando 100% de CO<sub>2</sub> como gás de proteção, e diminuir o aporte térmico.

Além da aplicação para soldagem de chapas finas, devido ao baixo aporte térmico, em relação ao MIG/MAG pulsado, ele possibilita também a soldagem de passes de raiz com abertura sem a presença de um *backing*, devido a sua maior controlabilidade em relação ao processo convencional [10]. Trata-se de um processo de alta frequência controlado por corrente que tem a capacidade de alterar a corrente de soldagem instantaneamente, controlando-a de acordo com as necessidades do arco elétrico. Sendo assim pode ser aplicado em soldagens semiautomáticas, onde a velocidade de soldagem e comprimento do eletrodo não são constantes [23].

Têm-se basicamente três parâmetros que devem ser programados na fonte antes do início da soldagem: PEAK, TRIM e velocidade de alimentação de arame. O PEAK pode ser ajustado de qualitativamente -10,0 até 10,0. Ele controla a corrente de pico do processo durante a fase em que o arco está aberto. Sendo assim é o maior responsável pelo aquecimento do metal base de modo a garantir a fusão adequada da raiz. Já o TRIM pode ser regulado também qualitativamente de 0,50 até 1,50. O seu valor ajusta o comprimento do arco elétrico. Sendo assim o arco é mais constrito e curto (enterrado) para pequenos valores, e largo e alongado para altos valores. A velocidade de alimentação de arame, como o próprio nome já diz, controla a quantidade de material alimentada no processo. Antes da definição dos parâmetros citados acima, deve-se escolher um programa da fonte adequado para a aplicação. Cada um dos programas é desenvolvido para uma aplicação (passe de raiz, chapas finas e outros), um tipo de gás de soldagem e um diâmetro de arame.

A forma de onda imposta pelo processo e seu funcionamento podem ser observados na Figura 24 [3,10,23,6].

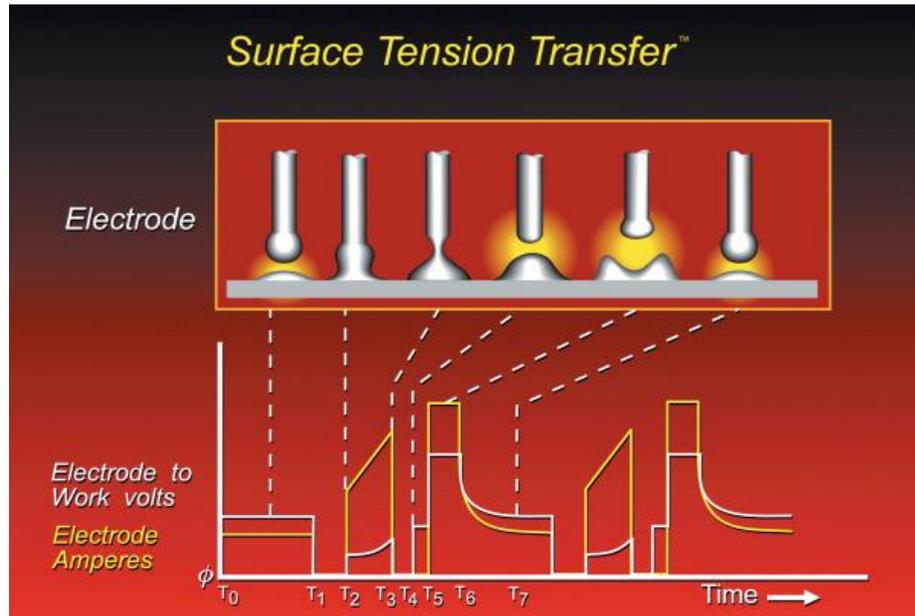


Figura 24 - Transferência metálica por curto circuito para o processo STT

Antes do curto circuito ( $T_0$ - $T_1$ ) tem-se a corrente de base. Ela mantém o arco aberto e é responsável por um ajuste fino do aporte térmico. Seu valor fica em torno de 50A e 100A. Quando o arame toca a poça de fusão, o curto circuito é rapidamente detectado pela fonte e a corrente é reduzida a um valor mínimo ( $T_1$ - $T_2$ ), necessário para manter o contato da gota com a poça de fusão, cerca de 10A, promovendo o seu molhamento ao invés de uma expulsão repulsiva da mesma. Em seguida é aplicada uma corrente de estrangulamento elevada de forma crescente ( $T_2$ - $T_3$ ). Esta é responsável por reduzir a seção transversal da ponte líquida, devido ao efeito *Pinch*, fazendo com que a gota seja transferida. Durante o estrangulamento, a variação da resistência elétrica com o tempo é calculada de forma indireta pela variação da diferença de potencial elétrico no tempo ( $dv/dt$ ). Quando esta indicar que a gota está na iminência do destacamento, a corrente é novamente reduzida para um patamar de cerca de 50A ( $T_4$ ), de forma a garantir uma transferência suave e sem respingos da gota por meio da tensão superficial. Passado este evento, a corrente é novamente levada a altos patamares ( $T_5$ - $T_6$ ) com o intuito de manter a extremidade do eletrodo aquecida, formar uma nova gota e fundir o metal base. Além disto, é também função da corrente de pico comprimir a poça contra o metal base, de modo a evitar um curto circuito acidental. A corrente deve então ser reestabelecida para o patamar da corrente de base ( $T_6$ - $T_7$ ). O reestabelecimento da corrente de pico para a corrente de base é feito de forma gradual (*Tail Out*), que nada mais é do que um ajuste de indutância do sistema. A redução da corrente por meio do *Tail Out* propicia o

amortecimento da agitação da poça de fusão, bem como um controle grosseiro do aporte térmico [23,6].

De forma resumida o processo STT apresenta potencial para realização de soldas de alta qualidade mesmo com CO<sub>2</sub> puro, garantindo uma maior repetitividade dos parâmetros de soldagem durante o tempo. Isto, pois o processo foi desenvolvido para fundir o mesmo volume de arame a cada ciclo, independente da DBPC, por meio da variação do tempo da corrente de pulso, o que garante um processo mais estável.

### 2.3 Norma API 1104

Para garantir a qualidade das uniões de uma linha dutoviária, são necessários procedimentos de soldagem adequados e técnicas que possibilitem a avaliação das juntas soldadas. Nesse sentido faz-se o uso das normas. No Brasil a norma usualmente aplicada é a API 1104 [24]. Trata-se de uma norma americana da *American Petroleum Institute*. Ela compreende as aplicações de compressão, bombeamento e transmissão de óleo cru e derivados de petróleo, além de dióxido de carbono e nitrogênio. Dentre os processos de soldagem qualificados pela norma temos o MIG/MAG e suas variantes de forma mecanizada. Quanto aos materiais qualificados pela norma são aceitos aços API da série 5L assim como materiais que seguem as especificações da ASTM.

Primeiramente deve-se ficar atento a geometria e preparação da junta conforme indica a norma. A superfície a ser soldada, de acordo com a norma, deve ser uniforme e livre de contaminações como gordura, tinta, escória e outros tipos de material que possam afetar a qualidade da solda. Além disso, o desalinhamento máximo permitido entre dois tubos adjacentes com mesma espessura de parede é de 3 mm. O chanfro pode ser usinado ou cortado por oxi-corte, desde que tenha uma superfície uniforme. Para soldagens mecanizadas o início e fim das soldas devem ser esmerilhados.

Para que as soldas sejam aprovadas essas devem passar por ensaios destrutivos (ED) e não destrutivos (ND). Os ensaios destrutivos devem ser feitos para a qualificação do procedimento de soldagem. Já os ensaios não destrutivos podem ser feitos em todas as soldas feitas em campo, ou de forma amostral, de modo a aprova-las ou não.

Os ensaios destrutivos apontados pela norma incluem: ensaio de tração, teste *nick break*, dobramento da raiz e face da solda e dobramento lateral da solda. Para cada um desses ensaios a norma especifica de onde devem ser retirados os corpos de prova e como os mesmos devem ser usinados. Além disso, é claro, a norma especifica quais as condições

mínimas devem ser atendidas pelas juntas soldadas de modo que essas sejam aceitas. Essas condições correspondem à região onde a fratura deve ocorrer (no material base para aprovação), além de tensões mecânicas mínimas que devem ser atingidas, de acordo com o material base. Como no presente trabalho foram executados somente passes de raiz, que por sua natureza são menos espessos que a parede do tubo e, portanto, menos resistentes, os EDs não foram aplicados.

Já os ensaios não destrutivos englobam: ensaio radiográfico, ensaio de partículas magnéticas, líquido penetrante e ultrassom. Um ou mais dos ensaios, de acordo com o critério da empresa, deve ser escolhido de forma a avaliar as uniões. Se forem detectadas anomalias nos cordões de solda, estes devem ser reparados ou completamente removidos de acordo com a seção 10 da norma.

Como no presente foram realizados somente ensaios radiográficos dos cordões de solda, serão elucidados somente os padrões de aceitação da norma adotados para radiografias. Os padrões de aceitação para os outros ensaios não destrutivos são similares, porém não idênticos na totalidade. Nos parágrafos seguintes são descritos os tipos de defeitos que podem ser identificados por meio de ensaio radiográfico. Ao final destes é apresentada uma tabela com os critérios de aceitação deles (Tabela 3).

A penetração inadequada sem a presença de *high-low* (*Inadequate Penetration Without High-Low*) no tubo é definida como o preenchimento incompleto do passe de raiz (Figura 25, b). Já a penetração inadequada devido a presença do *high-low* (*Inadequate Penetration Due to High-Low*) é definida como sendo a não adesão de uma das extremidades da raiz devido ao desalinhamento do tubo (Figura 25, a). Os critérios de aceitação podem ser vistos na Tabela 3.

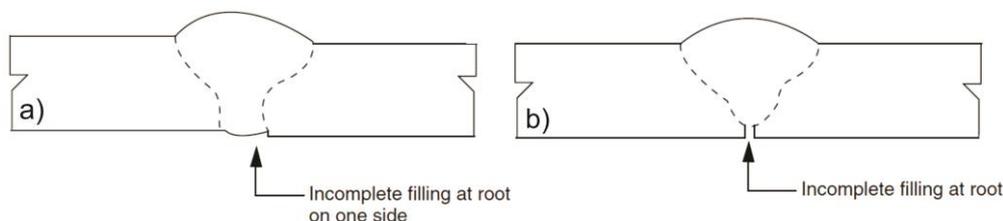


Figura 25 - a) Penetração inadequada devido a presença de high-low b) Sem high-low

Já a falta de fusão pode ser de dois tipos. Falta de fusão exposta à superfície entre o metal de solda (MS) e o metal de base (MB) (*Incomplete Fusion*) e falta de fusão entre dois cordões de solda ou entre o MS e o MB não expostos a superfície (*Incomplete Fusion Due to Cold Lap*) (Figura 26). Os critérios de aceitação podem ser vistos na Tabela 3.

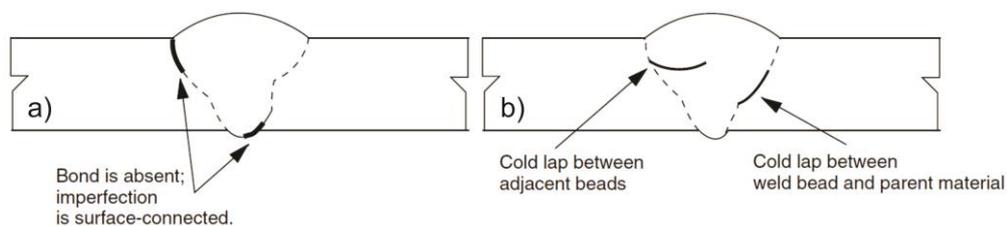


Figura 26 - a) Falta de fusão exposta à superfície b) Falta de fusão não exposta à superfície

A concavidade da face da raiz interna ao tubo (*Internal Concavity*) também é considerado um defeito (Figura 27). A face interna da raiz é considerada ideal quando é convexa. Os critérios de aceitação podem ser vistos na Tabela 3.

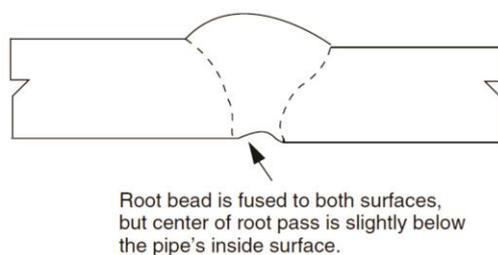


Figura 27 - Concavidade face interna da raiz

A perfuração (*Burn Through*) é outro defeito que é definido como uma porção do passe de raiz onde penetração excessiva fez com que a poça de fusão fosse forçada para dentro do tubo (Figura 28). Os critérios de aceitação podem ser vistos na Tabela 3.

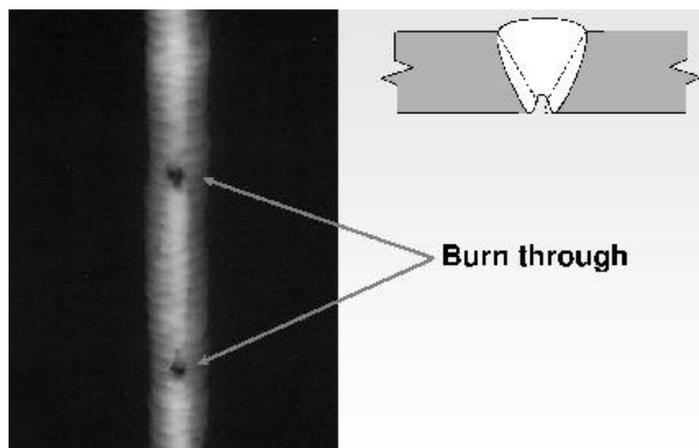


Figura 28 - Perfuração (*BurnThrough*) na raiz

Inclusões de escória (*Slag Inclusions*) são defeitos sólidos não metálicos presos no MS ou entre o MS e o MB (Figura 29). Estas podem ser inclusões alongadas (ESI), normalmente encontradas na linha de fusão, ou inclusões isoladas (ISI), as quais possuem

forma irregular e podem ser encontradas em qualquer posição na solda. Os critérios de aceitação podem ser vistos na Tabela 3.

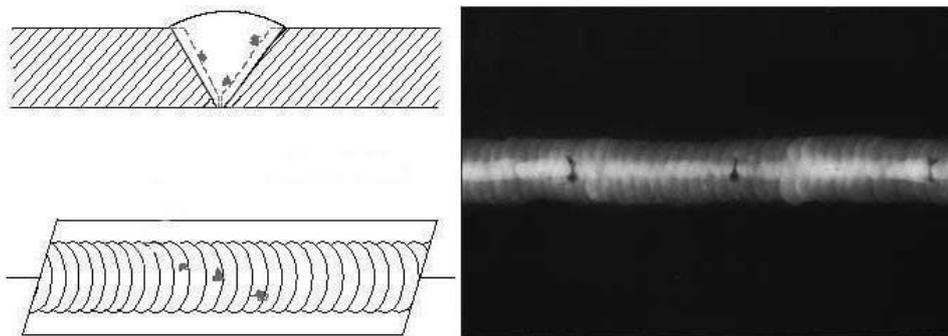


Figura 29 - Inclusões de escória

A porosidade (*Porosity*) é outro defeito definido como um bolsão de gás preso dentro do metal de solda já solidificado. Ela ter forma esférica, alongada (*wormhole*) ou irregular. São três as classificações para os poros. Porosidade individual ou dispersa (*Individual Porosity*), a qual é caracterizada, como o próprio nome diz, por poros individuais. Porosidade agrupada (*Cluster Porosity*), que é definida por um grande número de poros concentrados em uma região específica da solda. Porosidade de vazio (*Hollow-Bead Porosity*) a qual é caracterizada por poros alongados presentes no passe de raiz. Os critérios de aceitação podem ser vistos na Tabela 3.

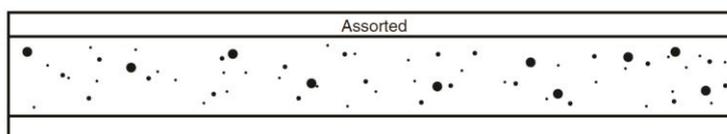


Figura 30 - Porosidade dispersa

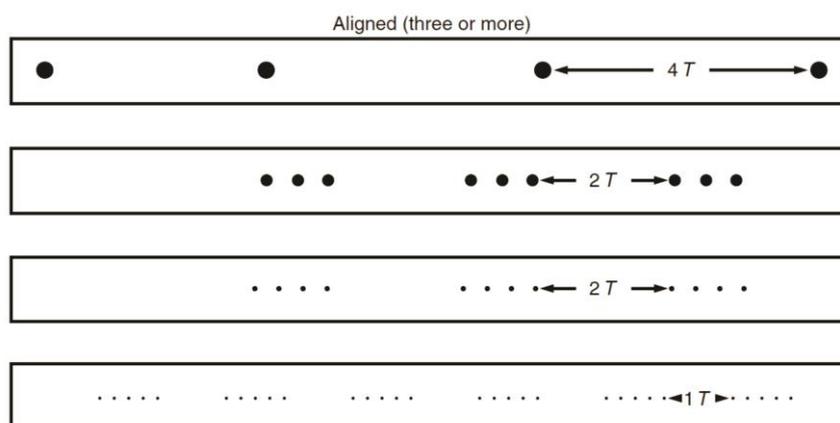


Figura 31 - Critério de aceitação para distribuição de poros

Defeito	Subdivisão	Critério de Aceitação
Penetração Inadequada	Sem High-Low	Se $l_{ind} \leq 25$ mm Se $l_{tot} \leq 25$ mm para L = 300 mm Se $l_{tot} \leq 8\%$ de L para L < 300 mm
	Com High-Low	Se $l_{ind} \leq 50$ mm Se $l_{tot} \leq 75$ mm para L = 300 mm
Falta de Fusão	Exposta à Superfície	Se $l_{ind} \leq 25$ mm Se $l_{tot} \leq 25$ mm para L = 300 mm Se $l_{tot} \leq 8\%$ de L (L < 300 mm)
	Não Exposta à Superfície	Se $l_{ind} \leq 50$ mm Se $l_{tot} \leq 50$ mm para L = 300 mm Se $l_{tot} \leq 8\%$ de L
Concavidade Interna	Densidade menor do que o material adjacente mais fino	Qualquer comprimento é aceitável
	Densidade maior do que o material adjacente mais fino	Aplica-se o critério adotado para perfuração (abaixo)
Perfuração	Diâmetro externo do tubo maior do que 60,3 mm	Se $l_{ind} \leq 6$ mm e densidade do defeito inferior à do material adjacente mais fino Se $l_{ind} \leq t_{tubo}$ e densidade do defeito na radiografia inferior à do material adjacente mais fino Se $l_{tot} \leq$ do que a seção adjacente mais fina e $l_{ind} \leq 13$ mm para L = 300 mm ou $l_{tot}$
Inclusões de Escória	Diâmetro externo do tubo maior do que 60,3 mm	Se $l_{ind\ ESI} \leq 50$ mm Se $l_{tot\ ESI} \leq 50$ mm para L = 300 mm Se $w_{ind} \leq 1,6$ mm Se $l_{tot\ ISI} \leq 13$ mm para L = 300 mm Se $w_{ind\ ISI} \leq 3$ mm Se mais do que 4ISIs com $w_{ind} \leq 3$ mm para L = 300 mm Se $l_{tot\ ESI}$ ou $l_{tot\ ISI} \leq 8\%$ de L
Porosidade	Individual	Se $l_{ind} \leq 3$ mm Se $l_{ind} \leq 25\%$ de $t_{tubo}$ Se a distribuição não exceder a permitida pela Figura 30, 31
		Agrupada
	De Vazio	Se $l_{ind} \leq 13$ mm Se $l_{tot} \leq 50$ mm para L = 300 mm Se $l_{ind} \leq 6$ mm e separados por mais de 50 mm Se $l_{tot} \leq 8\%$ de L

Tabela 3 - Critério de aceitação de defeitos. Onde  $l$  indica o comprimento principal do defeito (individual ou total), L o comprimento do cordão de solda,  $w$  a largura do defeito e  $t$  a espessura do tubo

Trincas (*Cracks*) são consideradas defeitos, independente do tamanho, se estas estiverem em qualquer posição do cordão de solda, com exceção do início e final da soldagem. Se o comprimento das trincas no início e final da solda for superior a 4 mm, estas também serão consideradas defeitos.

Mordeduras (*Undercutting*) são defeitos caracterizados pela formação de um entalhe, vazio, por fusão no metal base devido à execução de um passe de soldagem. É considerado um defeito se o comprimento agregado desse, em uma solda contínua de 300 mm de comprimento, exceder 50 mm ou se o comprimento agregado do defeito for superior à 1/6 do comprimento da soldagem.

O acúmulo das imperfeições, citadas acima, é considerado um defeito se o comprimento agregado das mesmas for superior a 50 mm em um cordão de solda de 300 mm de comprimento, ou se o comprimento agregado dos defeitos for superior a 8% do comprimento do cordão de solda.

Além dos defeitos citados, há outros que não foram elucidados nesse texto devido a sua não aplicação em passes de raiz.

A Norma API 1104 não é a única que poderia ser aplicada para a avaliação dos cordões de solda do presente trabalho. O código para a soldagem estrutural de aços da AWS (*American Welding Society*) [25], por exemplo, não pré-qualifica o processo de soldagem MIG/MAG Convencional com transferência metálica por curto circuito e o processo TIG para a soldagem de chanfros “U” e “V”. O código, no entanto não proíbe o seu uso, mas impõe uma série extra de testes para qualificação do processo, os quais incluem: inspeção visual, testes não destrutivos, ensaio de dobramento de raiz, testes em todas as posições de soldagem e inspeção de macrografias.

### 3 Equipamentos, Materiais e Métodos

Neste capítulo são demonstrados os equipamentos e materiais utilizados para a realização dos experimentos, além da preparação e análise dos corpos de prova e a metodologia experimental adotada.

#### 3.1 Equipamentos

A preparação dos corpos de prova, passando pela execução dos experimentos e finalizando com a análise dos resultados demandaram uma série de equipamentos. Estes são descritos nos parágrafos seguintes.

Foram adotadas duas fontes de soldagem, uma para cada processo: MTE Digitec 600 (MIG/MAG Convencional), da IMC Soldagem, e a Power Wave 455M/STT (STT) da Lincoln Electric. A fonte de soldagem MTE Digitec 600 (Figura 32, a) é uma fonte transistorizada de energia de soldagem, de fabricante nacional. Esta permite a execução de soldagem com os processos MIG/MAG (7 configurações), TIG (corrente constante ou pulsada), Plasma (corrente constante ou pulsada) e SMAW. Ela é totalmente controlada via software e possui um ajuste de indutância para o processo MIG/MAG. Um cabeçote de alimentação de arame modelo STA-20D, também da IMC, é utilizado em conjunto [26]. Já a fonte de soldagem Power Wave 455M/STT (Figura 32, b) é um equipamento que permite a soldagem pelo processo STT. Esta é também controlada por software. Um cabeçote de alimentação modelo Power Feed 10M Boom é utilizado em conjunto [26].



Figura 32 - a) Fonte de soldagem IMC Digitec 600; b) Fonte de soldagem Power Wave 455m/STT

Uma mesma tocha de soldagem foi utilizada com as duas fontes. Trata-se de uma tocha tipo *Narrow Gap* da fabricante alemã SPA. Esta tocha com o *SPAce System* permite

a soldagem de chanfros estreitos graças ao formato do bocal e bico de contato, que são mais alongados e finos.

Um manipulador robótico foi utilizado na execução das soldagens. Trata-se do Tartílope V4 da fabricante SPS (Sistemas e Processos de Soldagem) (Figura 33, a). O Tartílope V4 possui quatro eixos e se movimenta sobre um trilho circunferencial fixado ao tubo. Ele é composto por um CPU, um *joystick* e um monitor *touchscreen*. O manipulador permite a execução de soldagem com e sem tecimento [27].

Para a aquisição dos parâmetros de soldagem foi utilizado o Sistema de Aquisição de Dados de Soldagem (SAP), da fabricante SPS (Figura 33, b). Ele é composto por uma maleta e por uma série de sensores para medição de corrente, diferença de potencial elétrico, velocidade de arame e vazão de gás (Tabela 4), além de um software de aquisição. O SAP foi projetado para ser utilizado em conjunto com um *laptop* e possui uma taxa de amostragem de 5 kHz [28].

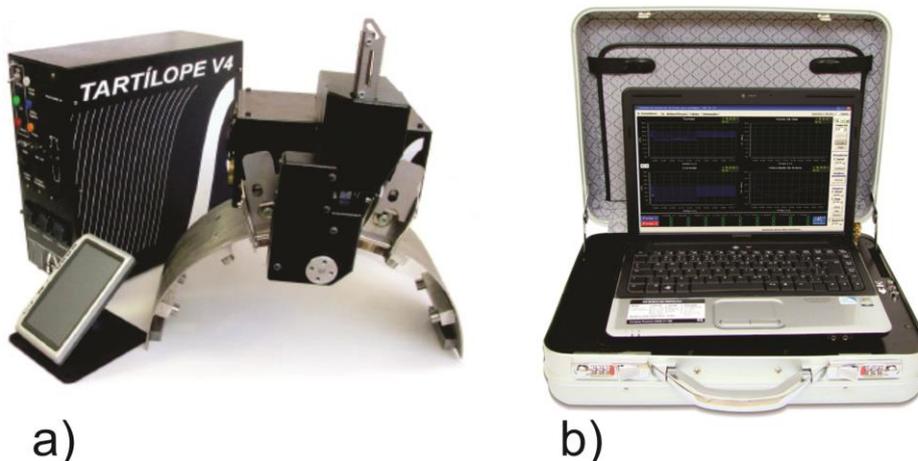


Figura 33 - a) Tatílope V4; b) SAP

Faixa de Medição			
Corrente [A]	Tensão [V]	V. Gás [L/min]	V. Arame [m/min]
-600,0 a 600,0	-100,0 a 100,0	0 a 20	0 a 500,0
Erro Al. 2%	Erro Al. 1%	Erro Al. 2%	Erro Al. 0,1%

Tabela 4 - Especificação técnica SAP

Todo o equipamento descrito acima foi utilizado em conjunto com a bancada experimental para a execução dos testes (Figura 34). A bancada experimental é composta por uma seção de tubo, de aproximadamente 400 mm de comprimento, soldada a uma mesa de aço. O trilho do Tartílope V4 fica fixado nesta seção de tubo. Em uma das faces

do tubo foi acoplada uma castanha. A castanha permite a fixação de corpos de prova para a execução da soldagem orbital.

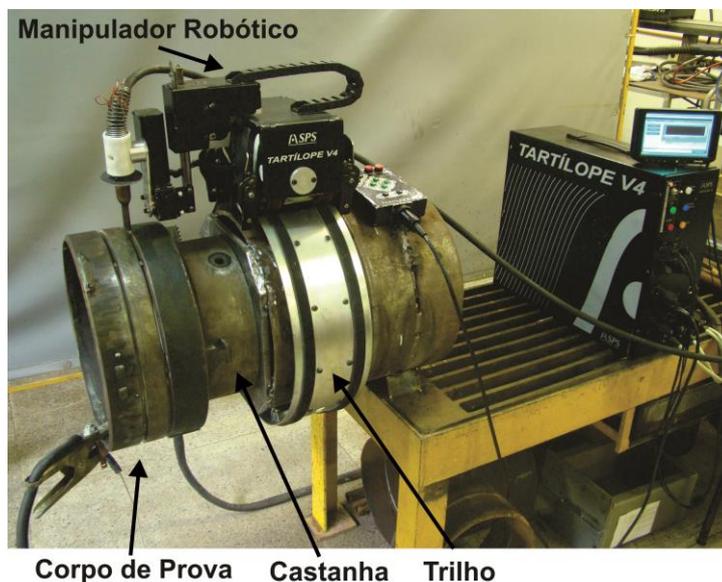


Figura 34 - Bancada de Soldagem

A preparação dos corpos de prova consiste em cortar seções de tubo, de 500 mm de comprimento, em seções menores e posteriormente usinar o chanfro nestas. Para o corte uma bancada especial foi montada (Figura 35, a). O corte é feito pelo processo corte plasma enquanto o tubo é rotacionado. Já a usinagem dos chanfros é feita com o auxílio de uma chanfradeira US150 da PROTEM (Figura 35, b) que é ativada hidráulicamente pelo módulo de força HPP050, também do mesmo fabricante (Figura 35, b). A chanfradeira permite a usinagem de chanfros em “U” e em “V”, além de outras operações.

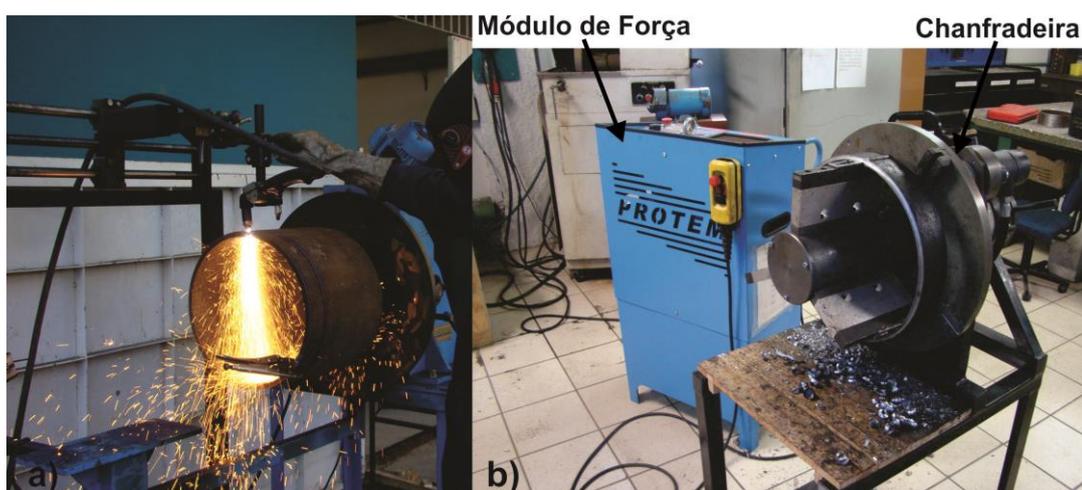


Figura 35 – a) Bancada de corte de tubos; b) Usinagem do chanfro

Para a preparação das macrografias dos cordões de solda, os corpos de prova foram serrados em uma serra fita. Feito isso as amostras foram lixadas e polidas manualmente em uma lixadeira e politriz da fabricante Arotec. As fotos das macrografias foram feitas em um estereoscópio e as radiografias dos cordões de solda em um equipamento do Labsolda.

### 3.2 Materiais

Foram utilizados tubos de aço ao carbono SAE 1020 como substrato. A sua escolha se deve principalmente à boa soldabilidade e baixo custo. Os tubos utilizados possuem diâmetro externo de 406,4 mm (16 in), comprimento médio de 70 mm e duas espessuras de parede: 10,2 mm ou 12,7 mm.

O material de adição foi o mesmo em todos os ensaios. O arame sólido ER70S-6 com diâmetro nominal de 1,0 mm ou 1,2 mm. Trata-se de um arame de aço ao carbono.

Os ensaios compreenderam dois tipos de gases de proteção: C25 (75% Ar + 25% CO<sub>2</sub>) e CO<sub>2</sub> puro.

Dois tipos de *backings* internos foram aplicados para a execução dos experimentos com o processo MIG/MAG Convencional: *backing* de cobre e *backing* de cerâmica (Figura 36). O *backing* de cerâmica é fixado por meio de uma fita adesiva de alumínio e por um anel de suporte ao tubo, que o pressiona contra a parede interna do tubo. Já o *backing* de cobre é fixado somente pelo anel de suporte.



Figura 36 - *Backing* de cobre e de cerâmica

### 3.3 Métodos

Primeiramente os corpos de prova tiveram que ser devidamente preparados. Partiu-se de seções de tubo de 500 mm de comprimento para pedaços menores, com cerca de 70 mm, através de corte plasma feito na bancada de corte dos tubos. Feito isto a superfície

cortada dos tubos foi desbastada por esmerilhamento, de modo a evitar o lascamento das pastilhas de aço rápido durante a operação de usinagem dos chanfros. Os tubos foram então fixados na chanfradeira e passaram por uma operação de faceamento, com uma pastilha reta, e posterior usinagem da geometria dos chanfros, “V” ou “U”, através de pastilhas dedicadas, sempre utilizando gordura animal como lubrificante. A usinagem foi feita com uma velocidade de corte baixa inicialmente (3 m/min), a qual foi gradualmente elevada até 11 m/min (maiores velocidades levavam a vibrações prejudiciais), quando a superfície usinada já se encontrava suave. O avanço adotado foi de cerca de 0,4 mm/rot. Terminada esta etapa, os chanfros foram esmerilhados, de modo a corrigir a não constância da espessura do nariz dos chanfros. Os tubos tiveram também a sua superfície externa, adjacente ao chanfro, esmerilhada. As seções de tubo foram ponteadas uma nas outras de modo a constituir uma junta para soldagem (Figura 37).

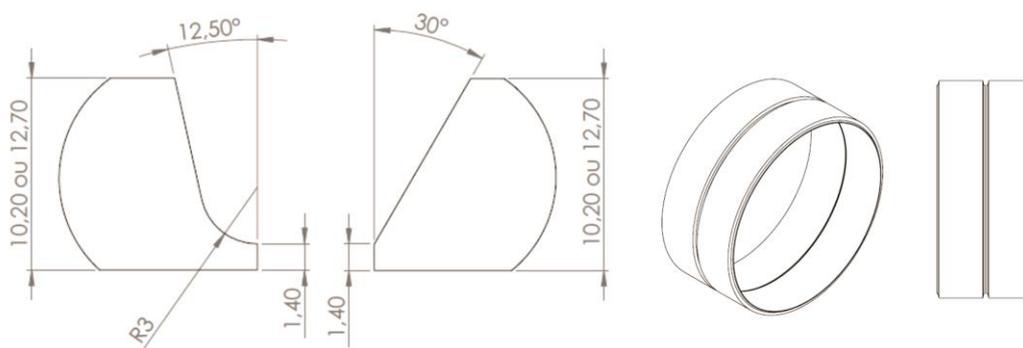


Figura 37 - À esquerda as duas geometrias de chanfro adotadas e à direita o corpo de prova

Com os corpos de prova preparados e a superfície a ser soldada limpa com acetona, pode-se partir para os experimentos. Os experimentos foram realizados tomando como base parâmetros de procedimentos adotados anteriormente. Para o caso do MIG/MAG Convencional, utilizou-se como base um procedimento utilizado na construção do Gasoduto Cacimbas-Catu, ao qual o Labsolda teve acesso. Já para o processo STT, adotaram-se inicialmente os parâmetros desenvolvidos no Labsolda por Direne [10]. Ao longo do trabalho os ensaios foram sendo adaptados conforme a necessidade. Todos os ensaios foram executados diretamente sobre os tubos de forma mecanizada com o Tartilope V4. A corrente de soldagem, diferença de potencial elétrico do processo e velocidade de alimentação de arame foram coletadas para todos os experimentos. As soldagens foram feitas sempre na vertical descendente ( $2 \times 180^\circ$ ) e a correção da trajetória foi feita pelo operador durante a soldagem, pelo *joystick* do Tartilope V4. A soldagem descendente foi adotada devido às qualidades atribuídas a esta, de acordo com as

referências, como maior velocidade de soldagem, geometria do cordão de solda favorável e maior estabilidade do processo. No caso do processo MIG/MAG Convencional foi utilizado um *backing* de cobre ou de cerâmica. Para a soldagem do segundo cordão de solda, no mesmo corpo de prova, o início e o fim do primeiro cordão foram esmerilhados (“unha”). Maiores detalhes a cerca dos experimentos podem ser observados na Tabela 5.

Processo	Arame	Gás	Backing	Gap	Chanfro
MIG/MAG Convencional	Ø1,2	C25	cobre	zero	U
	Ø1,2	C25	cobre	zero	V
	Ø1,0	C25	cobre	zero	U
	Ø1,0	C25	cobre	zero	V
	a ser escolhido	C25	cerâmica	zero	a ser escolhido
STT	Ø1,2	C25	-	variável	V
	Ø1,2	C25	-	variável	U
	Ø1,0	C25	-	variável	V
	Ø1,0	C25	-	variável	U
	a ser escolhido	CO <sub>2</sub>	-	variável	a ser escolhido

Tabela 5 - Planejamento dos experimentos

Com os experimentos executados, os cordões de solda com bom aspecto visual foram seccionados para a preparação de macrografias em três pontos: posição plana, vertical e sobre cabeça (Figura 38). Para isso os tubos já soldados foram primeiramente cortados por corte plasma. Feito isso, os anéis foram cortados em dois semicírculos e posteriormente serrados na serra fita, transversalmente ao cordão de solda, em pedaços menores. Esses foram preparados com lixas com as granulometrias 100, 180, 320 600 e 1200 e polidos em um disco com solução de alumina. Os cordões de solda foram então imersos em uma solução de Nital 10% por 15 s. Os pedaços restantes dos semicírculos serrados foram radiografados. A avaliação das macrografias foi feita através do *software* de medição de imagens *ImageJ* (Figura 39).

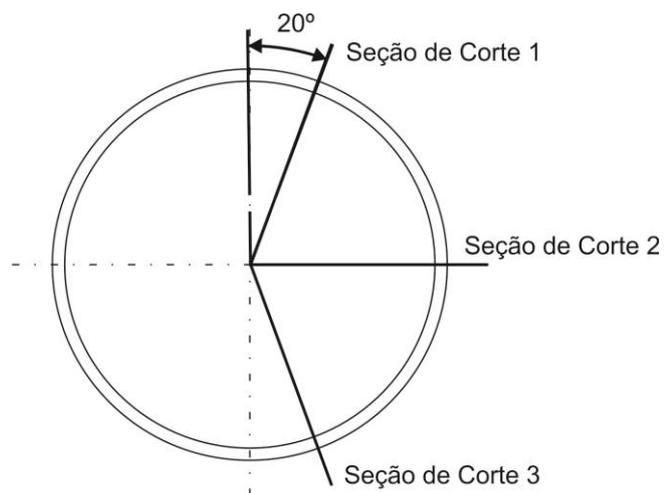


Figura 38 - Posição do corte das macrografias

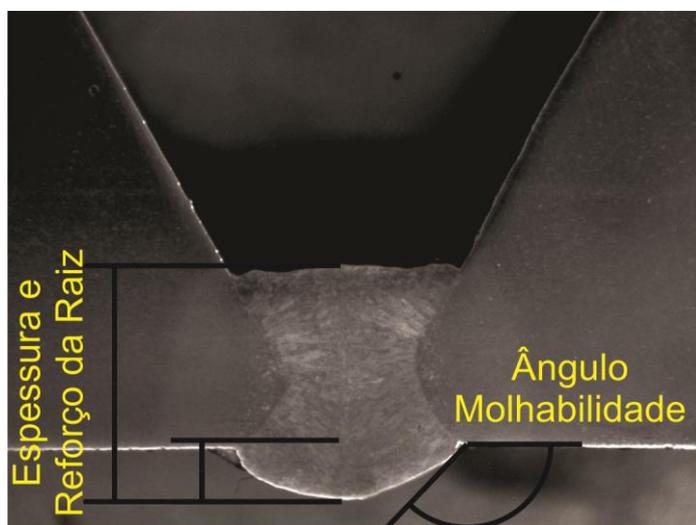


Figura 39 - Esquema medição nos cordões de solda

## 4 Resultados e Discussões

Neste capítulo são abordadas as dificuldades encontradas durante a realização e preparação dos experimentos, assim como a execução e avaliação da qualidade dos cordões de solda obtidos por eles.

### 4.1 Desafios na Preparação dos Tubos

A preparação dos corpos de prova pode aqui ser entendida como as etapas compreendidas entre a usinagem dos chanfros e alinhamento de duas seções de tubo.

Algumas dificuldades foram encontradas durante a preparação dos corpos de prova. Para a usinagem dos chanfros, os tubos devem ser fixados por aperto em uma castanha. A intensidade com que a seção de tubo é apertada contra a castanha determina, de forma marcante, a qualidade final do chanfro e do alinhamento do tubo. Isto porque o tubo, por possuir uma seção de aproximadamente 70 mm de comprimento, deforma facilmente quando excessivamente apertado (pequena seção resistente). Dessa forma o tubo fica com o diâmetro maior do que o nominal nas regiões próximas aos três pontos de apoio das castanhas, e menor do que o nominal nas regiões compreendidas entre os pontos de apoio (Figura 40).

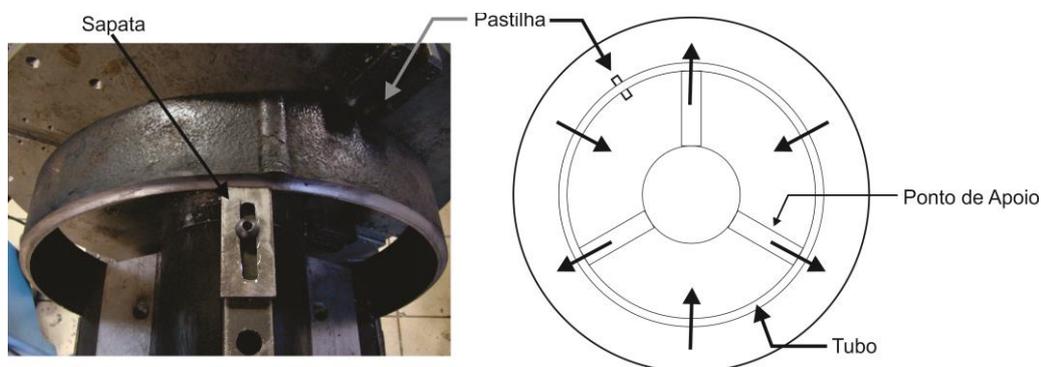


Figura 40 - Posição das sapatas e regiões de deformação do corpo de prova durante usinagem

Por outro lado, se o tubo não for suficientemente apertado, ele tende a escorregar na direção longitudinal devido ao movimento de avanço da pastilha durante a usinagem. Por estes motivos, foram feitas três pequenas sapatas que são fixadas nos apoios por parafusos. Estas impedem o escorregamento do tubo e minimizam a necessidade de aperto da castanha, diminuindo as deformações indesejáveis. Mesmo com essas precauções a deformação não é evitada e leva a não constância da espessura do nariz ao longo da circunferência, assim como dificuldade no alinhamento de duas peças (*High-Low*

induzido). Sendo assim, após a usinagem do chanfro, as regiões que apresentam uma espessura do nariz maior que a nominal são identificadas e posteriormente corrigidas por esmerilhamento.

Para controlar a qualidade dos chanfros quatro medições por tubo foram feitas, separadas em intervalos de 90°, em 8 tubos (4 com chanfro “U” e 4 com chanfro “V”), para determinação da espessura média de nariz obtida pelo procedimento adotado. Chegou-se a um valor médio de  $1,46 \pm 0,63$  mm para um intervalo de confiança de 95%. De acordo com a ficha de processo de um procedimento adotado na construção do Gasoduto Cacimbas-Catú, o valor médio indicado para a espessura de nariz foi de  $1,35 \pm 0,2$  mm. Não se sabe, no entanto, para qual intervalo de confiança o valor indicado foi calculado. Acredita-se que em campo seja possível conseguir um chanfro com maior constância ao longo da circunferência. Isto porque as seções de tubo, que tem em média 12 m de comprimento cada, oferecem maior resistência à deformação do que seções com apenas 70 mm de comprimento.

O alinhamento dos tubos foi feito de forma manual, sem ajuda de um equipamento especial. Para garantir o espaçamento (*gap*) fez-se o uso de um arame ou chapa metálica. Tentou-se respeitar sempre um desalinhamento máximo de 3,0 mm, conforme indica a norma, o que foi possível. Após o ponteamento de duas seções, notou-se que o *gap* tende a ficar mais estreito próximo aos pontos de solda e mais espaçado nos pontos distantes.

## 4.2 Experimentos MIG/MAG Convencional

Nos tópicos seguintes são discutidos os experimentos que adotaram o processo de soldagem MIG/MAG Convencional. Em todos eles o espaçamento (*gap*) adotado foi zero, o *backing* utilizado foi o de cobre, a espessura de parede do tubo adotado foi de 10,2 mm e a vazão do gás de araste ajustada em  $23 \text{ l/min}$ .

### 4.2.1 Chanfro U, Arame 1,2 mm e *Backing* de Cobre

Na medida em que os testes foram sendo executados os parâmetros foram alterados com o intuito de se obter um cordão de solda com bom aspecto visual, segundo a Norma API 1104. A execução dos experimentos até a obtenção de um cordão de solda com bom aspecto visual pode ser visualizada na Tabela 6.

Ensaio	Valores Ajustados									Valores Medidos		
	Va [m/min]	U [V]	Ks	Kd	Vs [cm/min]	a [mm]	f [Hz]	DBPC [mm]	$\alpha_{tocha}$ [graus]	Im [A]	Um [V]	Va [m/min]
1	9	25	17	10	95,3	0	0	17	0	244	23,3	-
2	9	25	17	10	89,5	0	0	17	0	221	24,2	-
3	9	25	17	10	89,5	0	0	17	15	277	22,9	9
4	9	25	17	10	89,5	1	5	17	15	291	22,8	9,1
5	9	25	15	25	89,5	1	5	17	15	254	21,1	9,1
6	9	25,5	15	25	89,5	1	5	17	15	264	20,9	9,1
7	9	25,8	30	30	89,5	1,5	5	17	15	266	22,2	9,1
8	9	25,8	30	30	89,5	1,5	5	17	7,5	274	22	9,2

Tabela 6 - Tabela execução dos experimentos MIG/MAG Convencional com arame de 1,2 mm

No ensaio 1, realizado com parâmetros similares ao procedimento aplicado em campo, foi identificada falta de penetração da raiz do cordão de solda já na posição plana. Com o intuito de conferir penetração completa na raiz do cordão, no ensaio 2, a velocidade de soldagem foi levemente reduzida. Mesmo com a sua redução, a penetração incompleta da raiz foi novamente observada já na posição plana. No ensaio 3 a tocha foi inclinada para a frente em 15° (puxando). Esta disposição possibilitou a penetração total da raiz somente na posição plana, devido a maior atuação do arco sobre o material base. Aqui foi observado um gotejamento da poça de fusão, devido à sua alta fluidez, no trecho entre posição vertical e sobre cabeça. Com o intuito de evitar o gotejamento da poça de fusão, assim como garantir melhor fusão da borda do chanfro, foi inserido no ensaio 4 um tecimento triangular com amplitude de 1 mm e frequência de 5 Hz. Este tecimento, apesar de ter evitado o gotejamento da poça de fusão, não solucionou o problema da falta de penetração na raiz do cordão na posição vertical. Provavelmente pelo fato de a poça de fusão estar escorrendo a frente do arco nesta posição, fazendo com que este atue mais intensamente sobre a poça e não sobre o material base. Na tentativa de diminuir a corrente média, e possivelmente a fluidez da poça, no ensaio 5 o Kd foi aumentado de 10 para 25. A situação ficou praticamente inalterada. No ensaio 6 a tensão elétrica do arco foi levemente aumentada para 25,5 V, com o intuito de conferir maior potência ao processo e assim penetração na posição vertical, o que não aconteceu. Foi observada ainda uma convexidade exagerada na face superior do cordão de solda. Para reduzir a convexidade do cordão, no ensaio 7, a amplitude do tecimento foi aumentada para 1,5 mm, o que solucionou este problema. Já o Kd e o Ks foram aumentados para 30 e a tensão elétrica para 25,8 V. Estes ajustes possibilitaram uma melhora da penetração na posição vertical, mas esta não foi

suficiente. Neste ensaio foi observada uma alta instabilidade do processo na posição vertical, talvez devido à grande inclinação da tocha. No ensaio 8 a inclinação da tocha foi reduzida à metade ( $7,5^\circ$ ). A instabilidade foi reduzida e o cordão de solda apresentou um bom aspecto visual, com penetração adequada ao longo de toda semicircunferência (Figura 41).



Figura 41 - Cordão de solda MIG/MAG Convencional com arame de 1,2 mm

Já as macrografias do cordão de solda do ensaio 8, em três posições distintas, são mostradas na Figura 42, assim como suas correspondentes medições na Tabela 7. Estes servem como uma primeira avaliação da junta soldada.

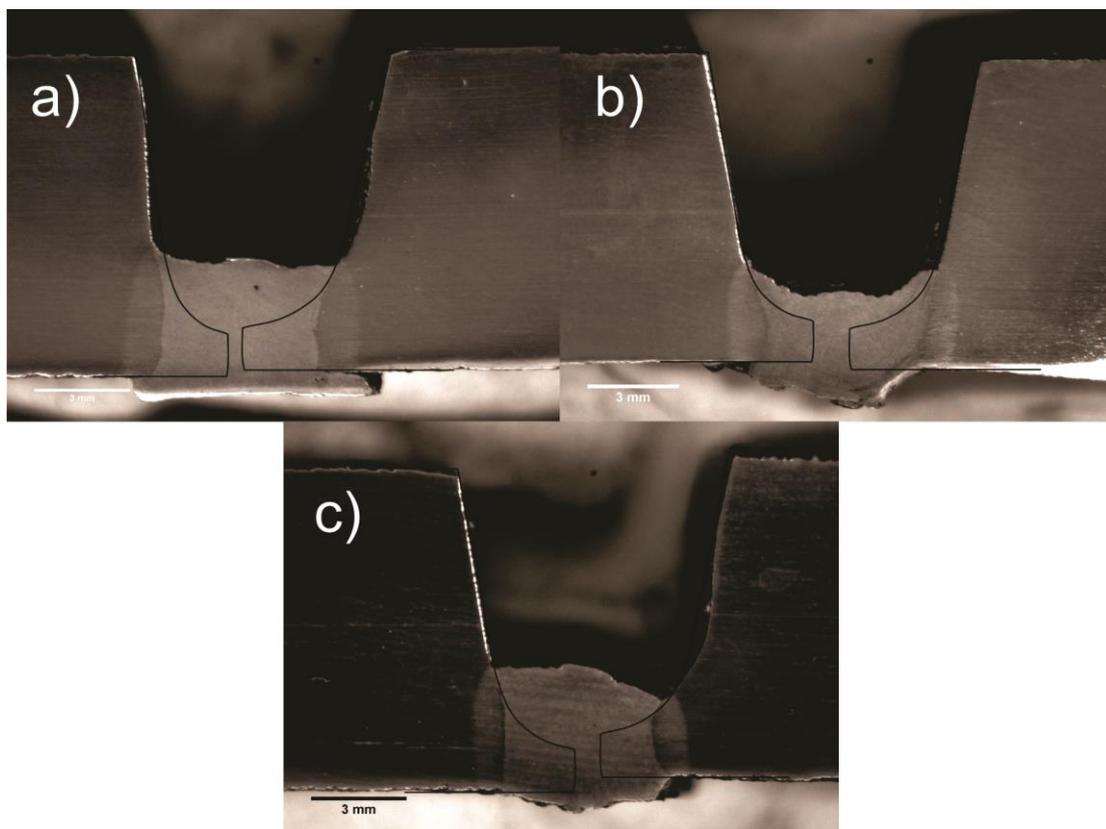


Figura 42 - Macrografias MIG/MAG Convencional com arame de 1,2 mm: a) posição plana, b) vertical e c) sobre cabeça

Identificação	Área Tot. [mm <sup>2</sup> ]	Área Dil. [mm <sup>2</sup> ]	Diluição [%]	R. Raiz [mm]	Espessura [mm]	Ângulo M. [graus]	High-Low [mm]
Plana	23,13	8,58	37%	0,85	4,45	35,42	0,21
Vertical	18,87	7,39	39%	1,29	3,93	137,60	0,26
Sobre C.	20,03	7,12	36%	1,13	7,72	125,93	0,49

Tabela 7 - - Medidas cordão de solda MIG/MAG Convencional com arame de 1,2 mm

Na macrografia correspondente a posição plana é possível observar a presença de um pequeno poro na parte superior do cordão, assim como outros três menores no canto direito do reforço da raiz. A geometria da face superior do cordão se mostra adequada para a deposição dos demais passes, por ser praticamente plana. No canto direito da raiz é ainda possível observar a presença de um entalhe na interface com o material base. Apesar de a norma não qualificar como um defeito este entalhe, sabe-se que ele funciona como um concentrador de tensão. Já nas macrografias correspondentes a posição vertical e sobre cabeça, o cordão de solda não apresenta nenhum defeito e tem a sua geometria adequada (raiz com ângulo de abertura grande). Na posição sobre cabeça o processo ainda se mostrou robusto para superar a presença de um *high-low* mais acentuado (0,49 mm). Em todas as posições foi observada uma boa taxa de diluição, provavelmente devido a alta corrente média empregada e a geometria do chanfro adotado (fina na extremidade).

A qualidade da junta ao longo de todo o seu comprimento pode ser avaliada de forma mais contundente através das radiografias (Figura 43).

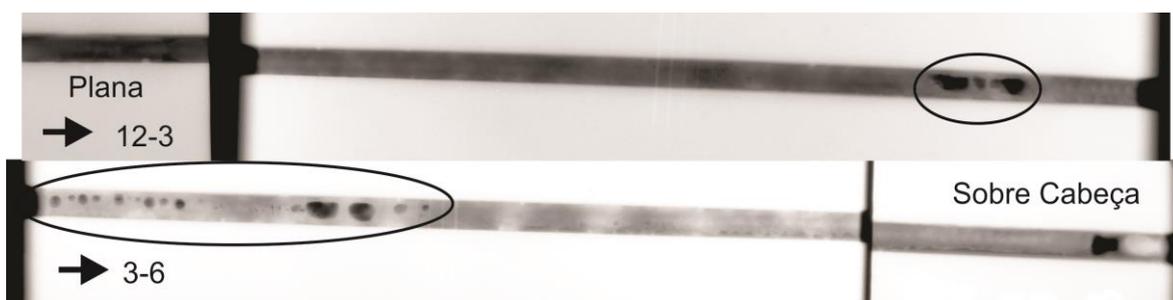


Figura 43 - Radiografia do cordão de solda MIG/MAG Convencional com arame de 1,2 mm

Na primeira metade da semicircunferência radiografada (12 a 3 horas) tem-se um cordão sem a presença de defeitos no trecho inicial. Somente no trecho vertical (próximo às 3 horas) é que são observadas grandes perfurações no cordão de solda, tendo duas destas mais do que 6 mm de comprimento. No segundo trecho (3 a 6 horas) há a presença de vários poros esféricos ao longo do cordão de solda, tendo alguns destes diâmetro superior à 3 mm. De acordo com a Norma API 1104 o cordão de solda seria reprovado, pois não atendeu aos critérios mínimos descritos no tópico 2.3.

A presença de trechos no cordão de solda com a ausência de defeitos intercalados com trechos defeituosos deve-se provavelmente a alta instabilidade do procedimento adotado, que pode ter sido incrementada pela variação da DBCP durante a soldagem. A estabilidade pode ser avaliada qualitativamente pelo ciclograma U x I ou quantitativamente pela análise dos períodos de transferência [11,18].

A Figura 44 corresponde ao ciclograma do procedimento. Quanto maior for a densidade das linhas mais estável é o processo. Isto significa que idealmente, a cada ciclo, os valores de tensão e corrente elétrica se repetem, caracterizando um processo em regime permanente, o que não acontece neste caso. Já o histograma (Figura 45) mostra a repetibilidade dos períodos de transferência. A avaliação deste pelo desvio padrão permite um número palpável para descrever o processo. No presente caso o período médio de transferência (PMT) e seu desvio padrão (DP), assim como o diâmetro modal da gota (DM) são demonstrados na figura.

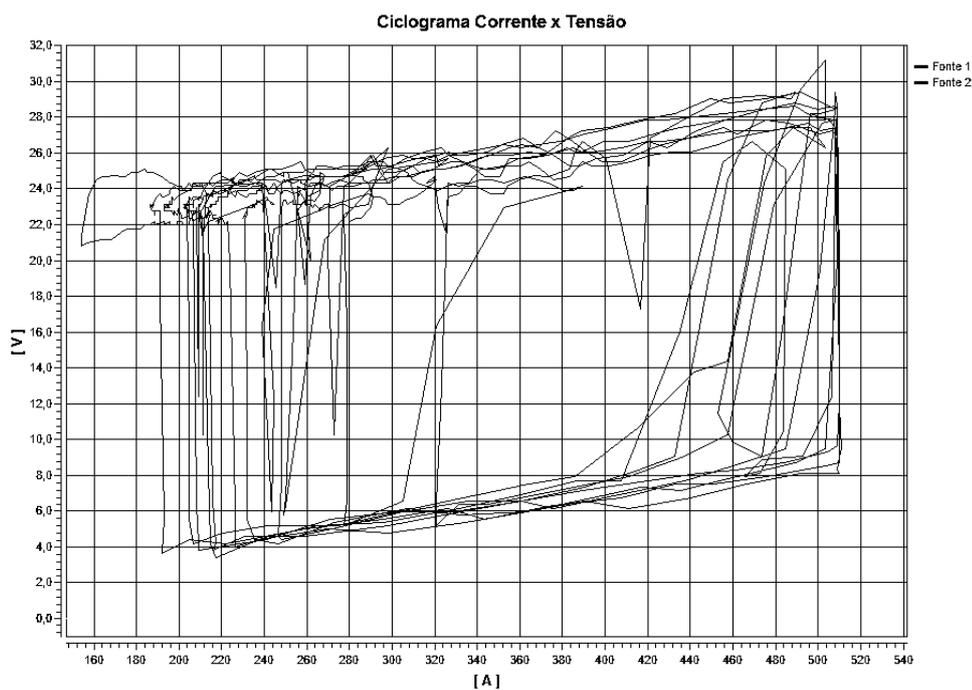


Figura 44 - Ciclograma I x U do processo MIG/MAG Convencional com arame de 1,2 mm

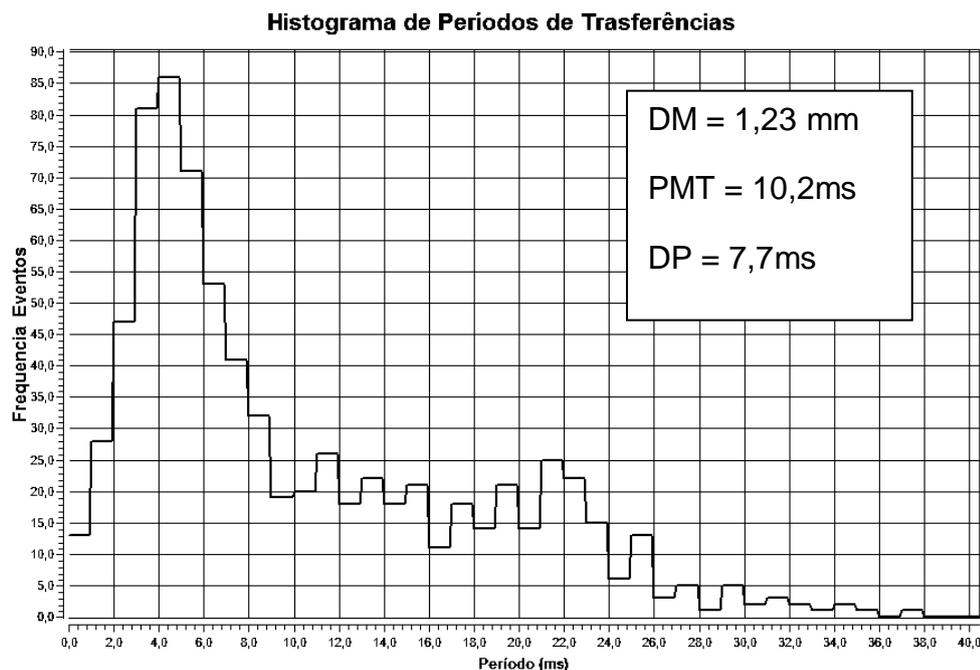


Figura 45 - Histograma do processo MIG/MAG Convencional com arame de 1,2 mm

#### 4.2.2 Chanfro U, Arame 1,0 mm e *Backing* de Cobre

A linha de análise deste experimento, assim como a análise dos próximos, será a mesma adotada anteriormente.

A execução dos experimentos (Tabela 8) teve como ponto de partida os valores ajustados no ensaio 8, para um arame de 1,2 mm de diâmetro.

Ensaio	Valores Ajustados							Valores Medidos				
	Va [m/min]	U [V]	Ks	Kd	Vs [cm/min]	a [mm]	f [Hz]	DBPC [mm]	$\alpha_{tocha}$ [graus]	Im [A]	Um [V]	Va [m/min]
1	13	25,8	30	30	90,0	1,5	5	17	7,5	229	23	13,2
2	12	24,8	30	30	90,0	1,5	5	17	7,5	214	22,4	12,2
3	12	24,8	30	30	90,0	1,8	5	15	7,5	228	23,7	5454

Tabela 8 - Tabela de execução dos experimentos com MIG/MAG Convencional com arame de 1,0 mm

A maior velocidade de arame, em relação ao experimento anterior, serviu para compensar a diminuição do diâmetro do arame, mantendo a mesma vazão mássica. No ensaio 1 o processo demonstrou uma certa instabilidade, o que pode ter ocasionado penetração incompleta da raiz na posição entre 3 e 6 horas. Para tentar diminuir a instabilidade, no ensaio 2, tanto a velocidade de alimentação de arame como a tensão elétrica do processo foram reduzidos. Neste caso o cordão apresentou uma convexidade indesejada na face e falta de penetração adequada na raiz. No ensaio 3 a amplitude de

tecimento foi aumentada para diminuir a convexidade e a DBPC foi reduzida para aumentar a corrente média de soldagem e estabilidade do processo. A maior amplitude permitiu a diminuição da convexidade e melhor fusão das laterais do chanfro. As alterações propiciaram penetração total da raiz de 12 a 6 horas. O aspecto superficial do cordão de solda pode ser visto na Figura 46. Já as macrografias e as medições destas na Figura 47 e Tabela 9 respectivamente.

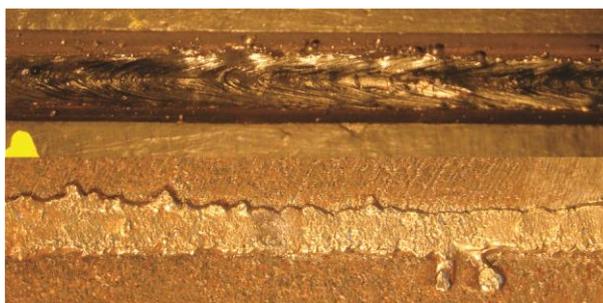


Figura 46 - Cordão de solda MIG/MAG Convencional com arame de 1,0 mm

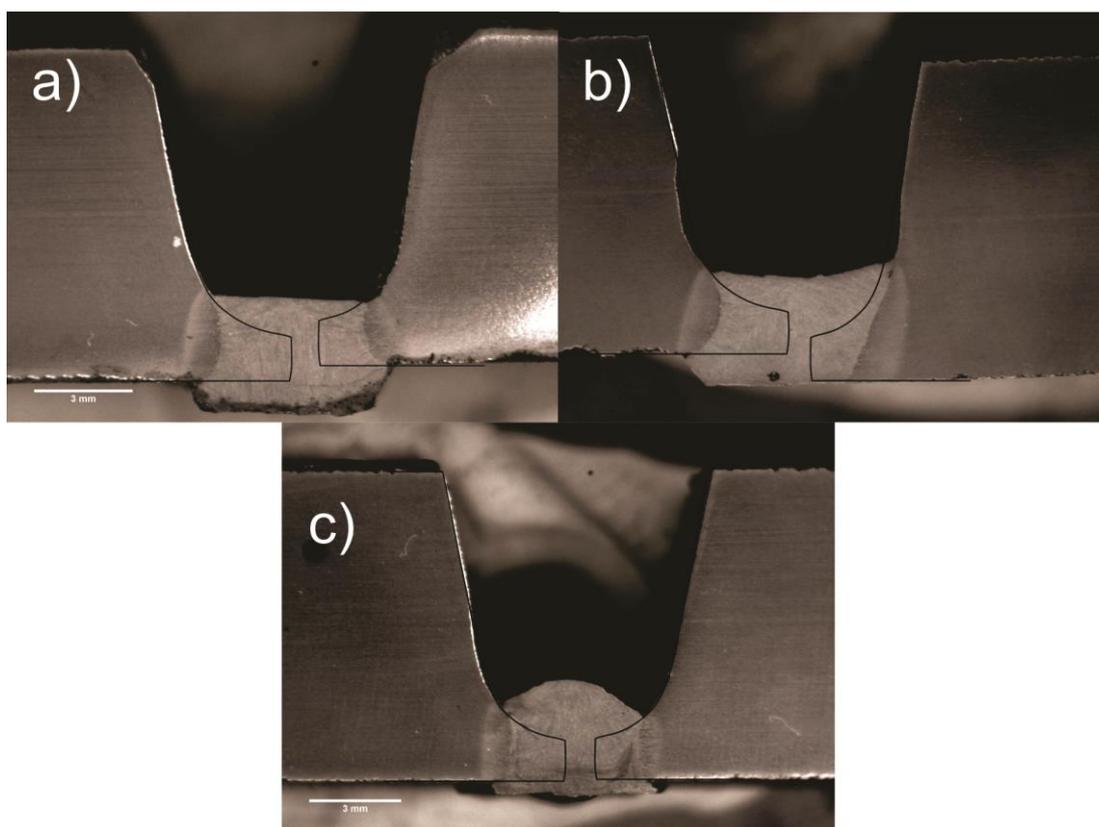


Figura 47 - Macrografias MIG/MAG Convencional com arame de 1,0 mm: a) posição plana, b) vertical e c) sobre cabeça

Identificação	Área Tot. [mm <sup>2</sup> ]	Área Dil. [mm <sup>2</sup> ]	Diluição [%]	R. Raiz [mm]	Espessura [mm]	Ângulo M. [graus]	High-Low [mm]
Plana	17,44	6,48	37%	1,30	3,68	107,60	0,48
Vertical	18,36	7,48	41%	1,01	3,56	128,32	0,87
Sobre C.	15,11	5,33	35%	0,57	3,89	40,50	0,07

Tabela 9 - Medidas do cordão de solda MIG/MAG Convencional com arame de 1,0 mm

Na posição plana pode ser observado um cordão sem defeitos internos. Apesar de não ser considerado um defeito pela norma, é observada uma região mais escura na parte inferior deste cordão de solda. Esta corresponde provavelmente a uma contaminação por cobre proveniente do *backing*. Na posição vertical há um pequeno poro na parte inferior da raiz, assim como o que parece ser uma falta de fusão no seu canto direito superior, na interface com o material base. Já na posição sobre cabeça o cordão apresentou uma maior convexidade, como já era esperado. Neste é ainda possível observar algumas bandas escuras. Estas bandas podem ser rechupes ou até mesmo à falta de fusão (canto esquerdo superior). Há ainda presença de um concentrador de tensão no canto direito inferior do cordão de solda (entalhe). O processo demonstrou mais uma vez a capacidade de superar desalinhamento, de 0,87 mm na posição vertical, assim como uma boa taxa de diluição em todas as posições.

Para melhor avaliação dos cordões de solda são mostradas as radiografias na Figura 48.

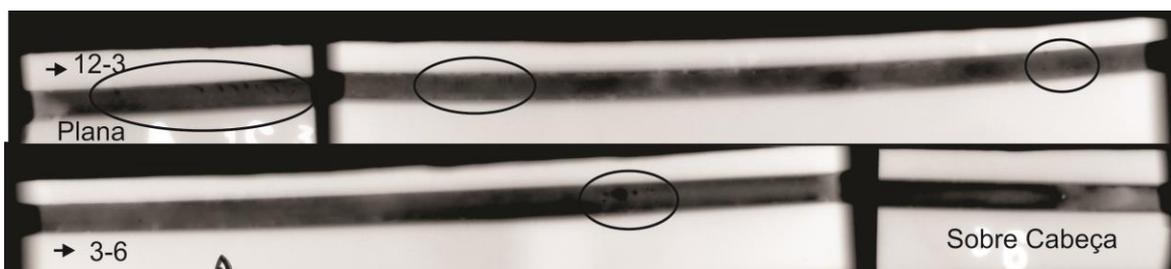


Figura 48 - Radiografias do cordão de solda MIG/MAG Convencional com arame de 1,0 mm

Aqui é mais uma vez possível identificar diversos defeitos ao longo do cordão de solda. Na primeira parcela do cordão de solda superior (12 a 3 horas), é possível notar a presença de diversos vazios alongados e curvados, o que os caracterizaria como poros. A disposição destes leva a crer que eles surgiram devido a alta velocidade de soldagem do procedimento. Aparentemente a velocidade de solidificação foi tão elevada que não permitiu que os gases deixassem a poça de fusão. Na segunda e terceira parcela do primeiro cordão de solda aparecem poros alongados (*wormholes*) e esféricos

respectivamente. Já no cordão de solda inferior (3 a 6 horas) há uma indicação de defeito. Mais uma vez aparece um grande poro rodeado por outros menores. Pela quantidade e dimensão dos defeitos encontrados, este cordão de solda também seria reprovado.

Para avaliação da estabilidade do procedimento adotado são mostrados o ciclograma I x U (Figura 49) e o histograma dos tempos de transferência (Figura 50). Comparando este ciclograma com o apresentado anteriormente, aparentemente o processo anterior foi mais estável. Já o histograma, pelo desvio padrão, indica uma maior repetibilidade deste processo em comparação ao anterior com maior diâmetro de arame. Apesar da diferença entre o desvio padrão ser pequena, a maior repetibilidade deste refletiu em um cordão de solda com defeitos mais constantes, e menores em tamanho médio, ao longo do cordão de solda. Novamente a variação da DBCP durante a soldagem pode ter contribuído para uma maior instabilidade do processo.

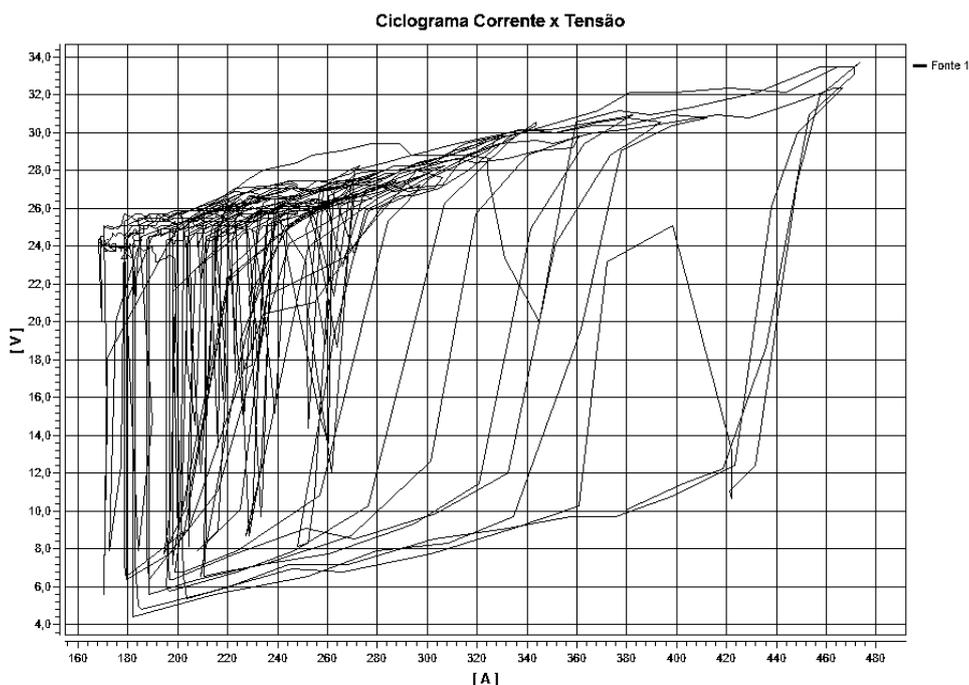


Figura 49 - Ciclograma do processo MIG/MAG Convencional com arame de 1,0 mm

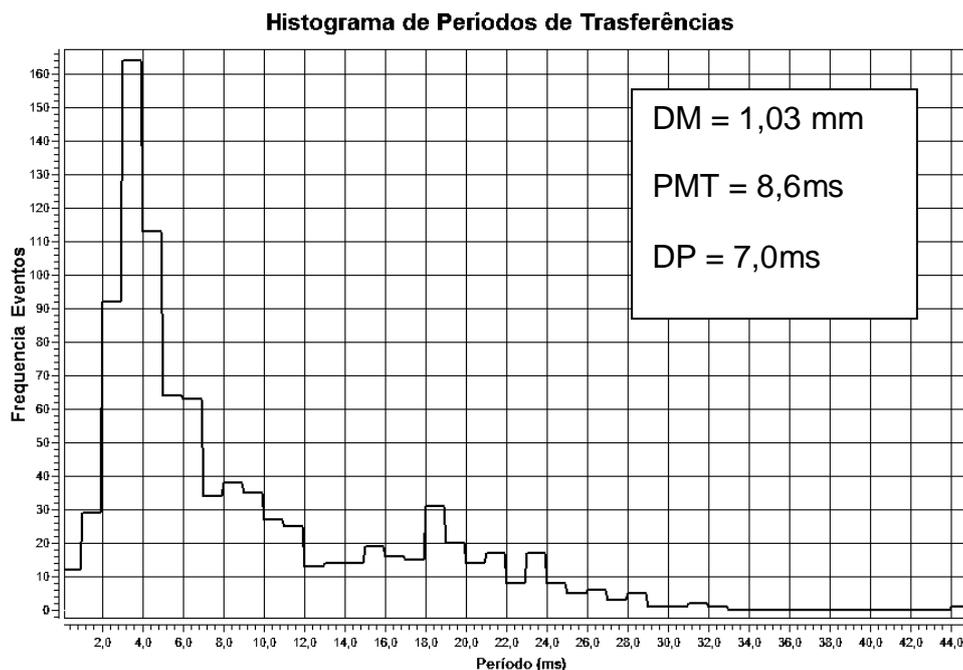


Figura 50 - Histograma do processo MIG/MAG Convencional com arame de 1,0 mm

#### 4.2.3 Chanfro V, Arame 1,0 mm e 1,2 mm e *Backing* de Cobre

Nestes casos não foi possível obter penetração total na raiz do cordão de solda fora de posição. Acredita-se que a penetração não foi possível devido a maior robustez deste chanfro em comparação ao chanfro “U”, o qual possui o nariz mais fino e demanda portanto menor potência para ser fundido. Uma alternativa aqui seria utilizar CO<sub>2</sub> puro como gás de proteção, que devido as suas características de condutibilidade térmica poderia levar à penetração adequada do cordão de solda. Porém devido à disponibilidade de tempo e ao planejamento inicial do trabalho esta tentativa não foi feita.

### 4.3 Experimentos Processo STT

Nos tópicos seguintes são discutidos os experimentos que adotaram o processo de soldagem STT. Nestes não foi feito o uso de *backings*, a espessura de parede do tubo adotado foi de 10,2 mm e a vazão de gás foi ajustada também em 23 l/min.

#### 4.3.1 Chanfro V e Arame 1,2 mm

Os experimentos com o processo de soldagem STT foram iniciados tomando como base os parâmetros adotados por Direne [6] e alterados conforme a necessidade. O número de experimentos necessários para se chegar a um cordão de soldagem adequado foi consideravelmente inferior, quando comparando com o processo convencional. Isto se

deve principalmente ao controle sinérgico do processo, o qual permite através de poucos parâmetros alterar o processo. Seguem na Tabela 10 os ensaios realizados.

Ensaio	Valores Ajustados								Valores Medidos			
	Va [m/min]	TRIM	PEAK	Vs [cm/min]	a [mm]	f [Hz]	DBPC [mm]	$\alpha_{tocha}$ [graus]	Gap [mm]	Im [A]	Um [V]	Va [m/min]
1	3,4	1,5	5	20,1	0	0	14	14	2	130	15,4	3,6
2	3,4	1,5	5	18,4	0	0	14	14	2	130	15,3	3,6
3	3,4	1,5	5	18,4	0	0	14	14	2,5	122	16,5	3,6

Tabela 10 - Tabela de execução dos experimentos com o processo STT com arame de 1,2 mm

Diferentemente do processo convencional, os ensaios com o STT foram executados sem tecimento de soldagem. No caso dos três ensaios foi utilizado o programa 119 da fonte de soldagem, o qual é especial para execução de passes de raiz. No ensaio 1 não houve penetração da raiz quando fora de posição. Na tentativa de garantir penetração da raiz quando soldando fora de posição, a velocidade de soldagem foi reduzida no ensaio 2, o que não solucionou o problema. Notou-se que durante a soldagem o chanfro tende a se fechar, provavelmente devido a contração do cordão de solda na solidificação, impedindo a penetração adequada da raiz. Sendo assim deve-se usar um chanfro mais aberto, de modo que quando este contrair não impeça a penetração adequada da raiz. No 3º ensaio preparou-se um corpo de prova com um *gap* nominal de 2,5 mm. Neste experimento o cordão de solda apresentou ótimo aspecto superficial (Figura 51) e penetração adequada de 12 à 6 horas. Foi possível notar que o procedimento sem tecimento se mostrou robusto para superar variações de *gap* entre 1,8 mm e 2,7 mm, os quais foram medidos antes da execução do passe de raiz. No caso dos ensaios 1 e 2 o menor *gap* medido foi de 1,5 mm.



Figura 51 - Cordão de solda do processo STT com arame de 1,2 mm

As macrografias do cordão de solda correspondente ao ensaio 3, assim como suas medidas, podem ser observadas na Figura 52 e Tabela 11 respectivamente.

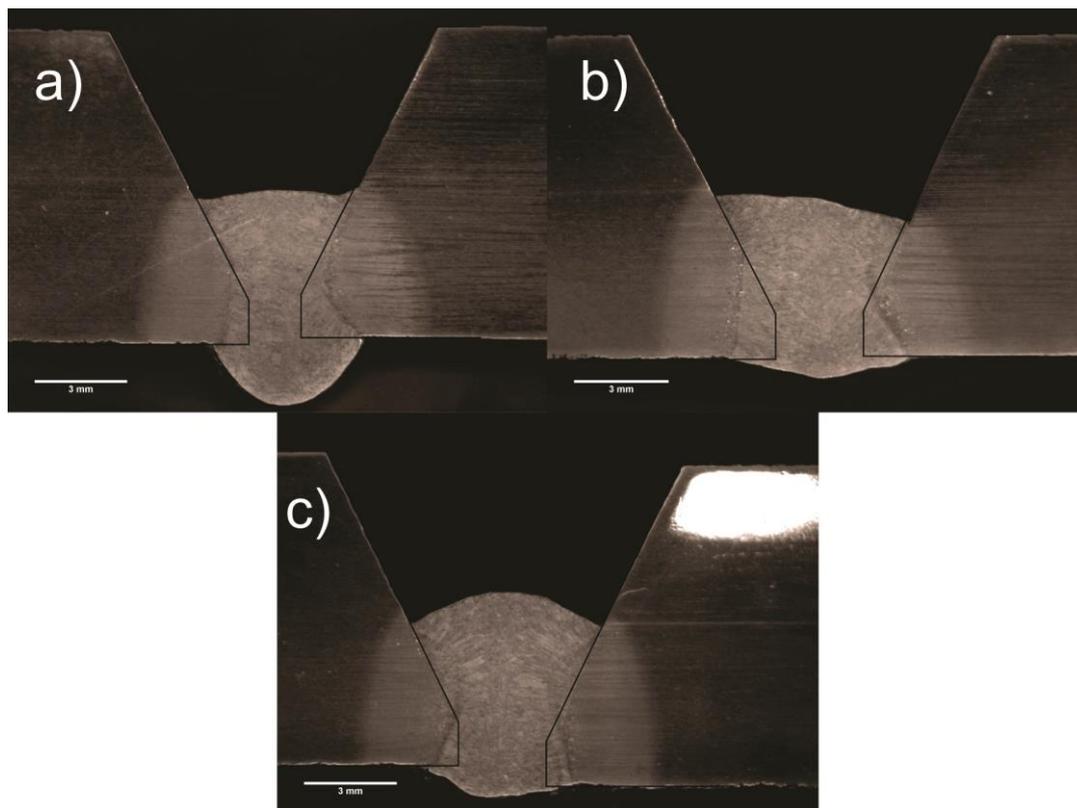


Figura 52 - Macrografias do cordão de solda do processo STT com arame de 1,2 mm: a) posição plana, b) vertical e c) sobre cabeça

Identificação	Área Tot. [mm <sup>2</sup> ]	Área Dil. [mm <sup>2</sup> ]	Diluição [%]	R. Raiz [mm]	Espessura [mm]	Ângulo M. [graus]	High-Low [mm]
Plana	25,88	4,69	18%	2,23	7,04	120,00	0,22
Vertical	27,02	5,15	19%	0,71	5,70	146,02	0,11
Sobre C.	28,62	2,42	8%	1,02	6,66	132,09	0,67

Tabela 11 - Medidas do cordão de solda do processo STT com arame de 1,2 mm

Ao inspecionar as macrografias fica claro que elas não apresentam nenhum defeito superficial. Aqui é também possível observar a grande variação do reforço da raiz, maior do que a encontrada nos ensaios demonstrados anteriormente com o processo MIG/MAG Convencional. Isto se deve a ausência de um *backing*, o qual limitaria o reforço máximo das raízes. Observado as tabelas com as medidas dos cordões é notável também a redução das taxas de diluição. Acredita-se que este fator se deva em maior parte a geometria mais robusta do chanfro “V”, mas também devido as menores correntes médias de soldagem do procedimento adotado. O ângulo de molhabilidade dos cordões de solda se mostram superiores, e sem a presença de entalhes, quando comparados ao obtidos pelo processo Convencional. A grande espessura do passe de raiz é um fato notável. Esta eliminaria a

necessidade de um passe quente. Um procedimento indicado pela Polysoude [1] indica uma espessura combinada de 5,5 mm até 6,0 mm do passe quente mais o passe de raiz.

As radiografias apresentadas na Figura 53 permitem uma melhor avaliação dos cordões de solda, segundo a norma.

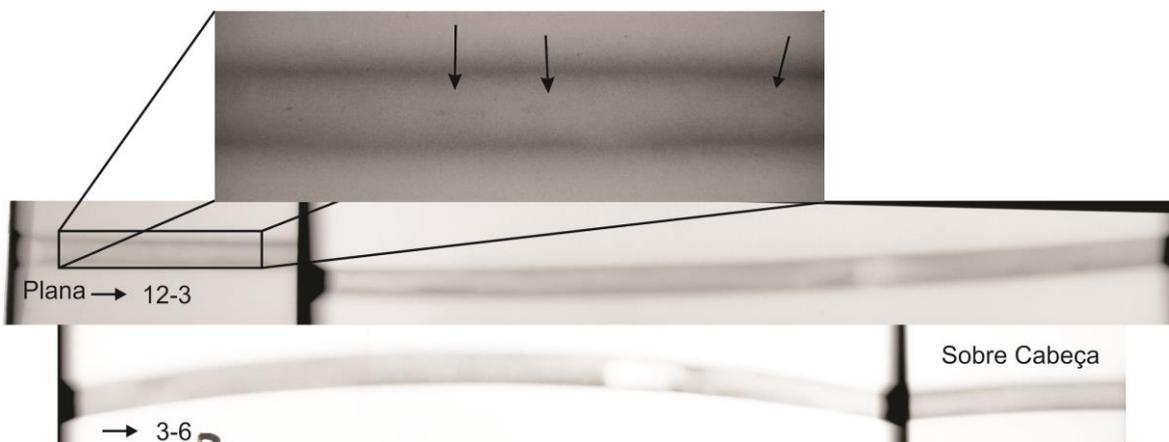


Figura 53 - Radiografia do cordão de solda do processo STT com arame de 1,2 mm

Como pode ser visto nas radiografias acima, o cordão de solda não apresenta grandes defeitos. Há apenas quatro pequenos riscos escuros quase que imperceptíveis, como mostrado em destaque na figura acima, que correspondem provavelmente a poros alongados ou à falta de fusão na lateral do chanfro. Os dois pontos mais claros observados nas radiografias correspondem à uma sobreposição de dois cordões de solda. Como o comprimento individual e total dos defeitos é inferior ao que a norma indica para a qualificação destes como defeitos, este cordão de solda seria aprovado.

Para a avaliação qualitativa da estabilidade do procedimento de soldagem faz-se o uso somente do ciclograma I x U (Figura 54). Neste caso não foi possível fazer uma avaliação por histogramas de tempo de transferência devido a limitações do *software* adotado. Pela simples avaliação do ciclograma já é possível notar a maior estabilidade do processo STT em relação ao MIG/MAG Convencional. As linhas do gráfico levantado mostram-se mais coesas, com uma tendência mais definida, caracterizando um processo mais próximo a um regime permanente. A maior estabilidade deste processo talvez se deva a sua robustez em relação às variações da DBCP. O processo STT trabalha para entregar um diâmetro de gota praticamente constante durante a soldagem, independentemente da DBCP, ou seja, a corrente média é regulada de forma manter-se constante. Já o processo MIG/MAG Convencional tem a sua corrente média de soldagem alterada com a variação

da DBCP, o que leva a alterações no diâmetro médio das gotas e, portanto, à maiores instabilidades.

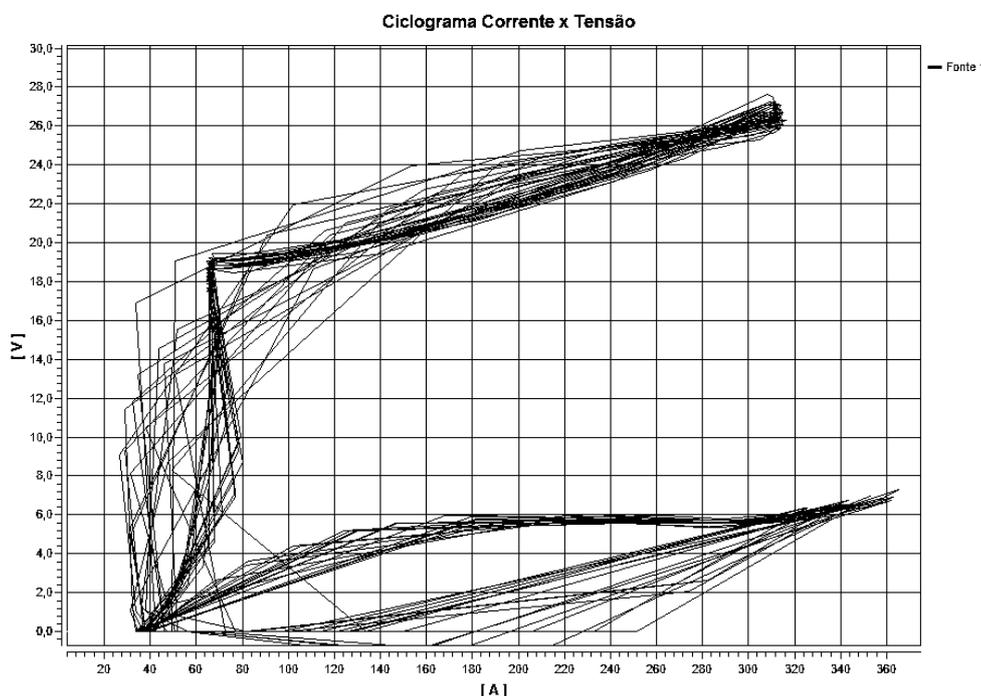


Figura 54 - Ciclograma I x U do processo STT com arame de 1,2 mm

### 4.3.2 Chanfro V e Arame de 1,0 mm

Seguindo a lógica anterior, os parâmetros ajustados para o arame de 1,2 mm foram adaptados para o menor diâmetro. Aqui se quis partir de um gap de 2,0 mm para verificar se um menor diâmetro de arame superaria espaçamentos mais estreitos. A execução dos experimentos pode ser observada na Tabela 12 abaixo.

Ensaio	Valores Ajustados									Valores Medidos		
	Va [m/min]	TRIM	PEAK	Vs [cm/min]	a [mm]	f [Hz]	DBPC [mm]	$\alpha_{tocha}$ [graus]	Gap [mm]	Im [A]	Um [V]	Va [m/min]
1	4,9	1,5	5	18,4	0	0	14	14	2	114	16,9	5,0
2	4,9	1,5	5	18,4	0	0	14	14	2,5	121	16,4	5,0

Tabela 12 - Tabela com a execução dos experimentos com o processo STT com arame de 1,0 mm

Como pode ser visto, foram necessários apenas dois ensaios para se chegar aos parâmetros adequados. O programa 113 da fonte de soldagem para passe de raiz foi o utilizado para a execução dos ensaios aqui descritos. No ensaio número 1 foi obtido um bom preenchimento e penetração da raiz em uma metade do tubo. No entanto, quando a segunda metade foi soldada, com os mesmos parâmetros, o chanfro novamente se fechou

não permitindo a penetração total da raiz. No ensaio 2 o *gap* foi aumentado para 2,5 mm. O aumento do espaçamento possibilitou a soldagem completa do tubo sem comprometer a penetração adequada da raiz. O aspecto superficial do cordão de solda obtido pelo ensaio 2 pode ser observado na Figura 55. Aqui é possível notar mais uma vez um cordão de solda homogêneo.

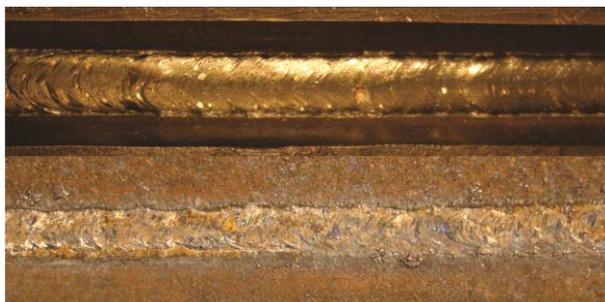


Figura 55 - Cordão de solda do processo STT com arame de 1,0 mm

As macrografias do cordão de solda exposto acima, assim como suas medidas, podem ser observadas na Figura 56 e Tabela 13 respectivamente.

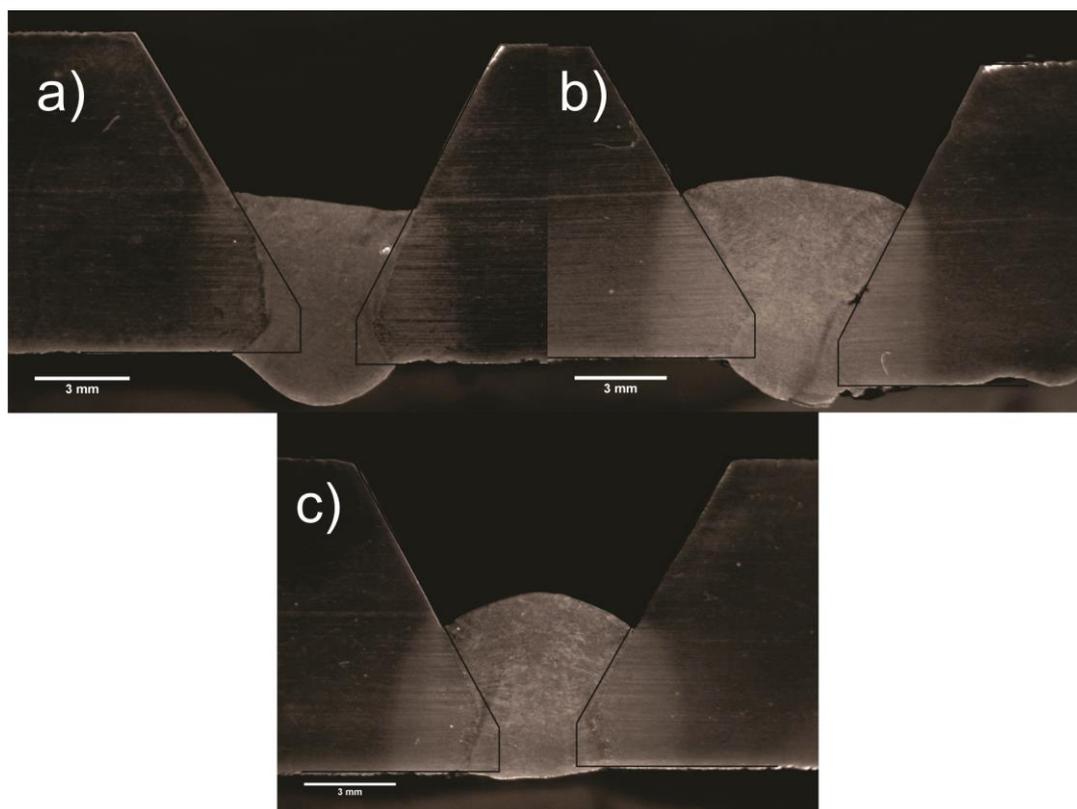


Figura 56 - Macrografias do cordão de solda do processo STT com arame de 1,0 mm: a) posição plana, b) vertical e c) sobre cabeça

Identificação	Área Tot. [mm <sup>2</sup> ]	Área Dil. [mm <sup>2</sup> ]	Diluição [%]	R. Raiz [mm]	Espessura [mm]	Ângulo M. [graus]	High-Low [mm]
Plana	26,18	5,43	21%	1,70	6,47	128,22	0,42
Vertical	33,53	1,92	6%	1,61	7,43	125,68	0,97
Sobre C.	26,73	3,62	14%	0,25	6,13	149,81	0,18

Tabela 13 - Medidas das macrografias do cordão de solda do processo STT com arame de 1,0 mm

Mais uma vez é possível notar que o reforço da raiz tem grande alteração da posição plana até a sobre cabeça. Dois pequenos defeitos podem ser observados nas macrografias: um pequeno poro na posição plana e o que aparenta ser uma falta de fusão na interface com o material base na posição vertical. Aqui é também possível observar a capacidade do processo STT em superar desalinhamentos, como o de 0,97 mm correspondente a posição vertical. Mais uma vez a taxa de diluição se apresentou inferior a observada pelos procedimentos que adotaram o processo MIG/MAG Convencional. Como no experimento anterior com o STT, este também mostra possibilidade de eliminação do passe quente, pois a menor espessura do passe de raiz medido foi de 6,13 mm. O ângulo de molhabilidade da raiz também se mostrou adequado, sem concentradores de tensão.

Partindo agora para a avaliação das radiografias correspondentes a uma metade do tubo, pode-se mais uma vez melhor avaliar a qualidade do cordão de solda (Figura 57).

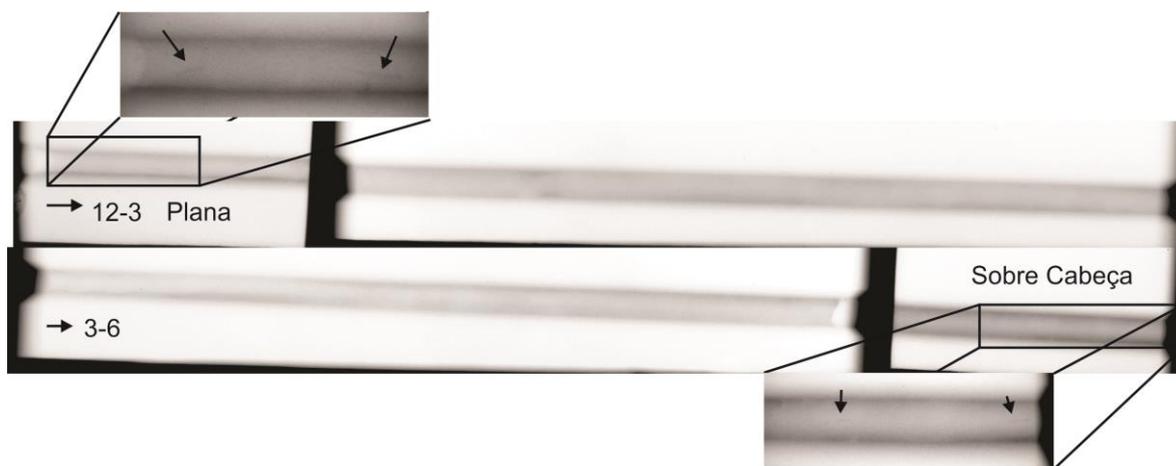


Figura 57 - Radiografia do cordão de solda do processo STT com arame de 1,0 mm

Mais uma vez apareceram pequenos riscos mais escuros, indicando ausência de material, no cordão de solda. Estes podem indicar poros alongados ou uma falta de fusão na lateral do chanfro. Estes não são suficientes para desqualificar o cordão de solda, pois os defeitos são pequenos em comprimento individual e total. O cordão de solda seria então aprovado de acordo com os critérios da Norma API 1104.

A avaliação qualitativa da estabilidade do procedimento adotado segue através da observação do ciclograma I x U (Figura 58). Mais uma vez o processo STT se mostra claramente mais estável do que o processo Convencional. Este procedimento aparenta, no entanto, ter sido um pouco mais instável do que o procedimento que adotou um arame de 1,2 mm.

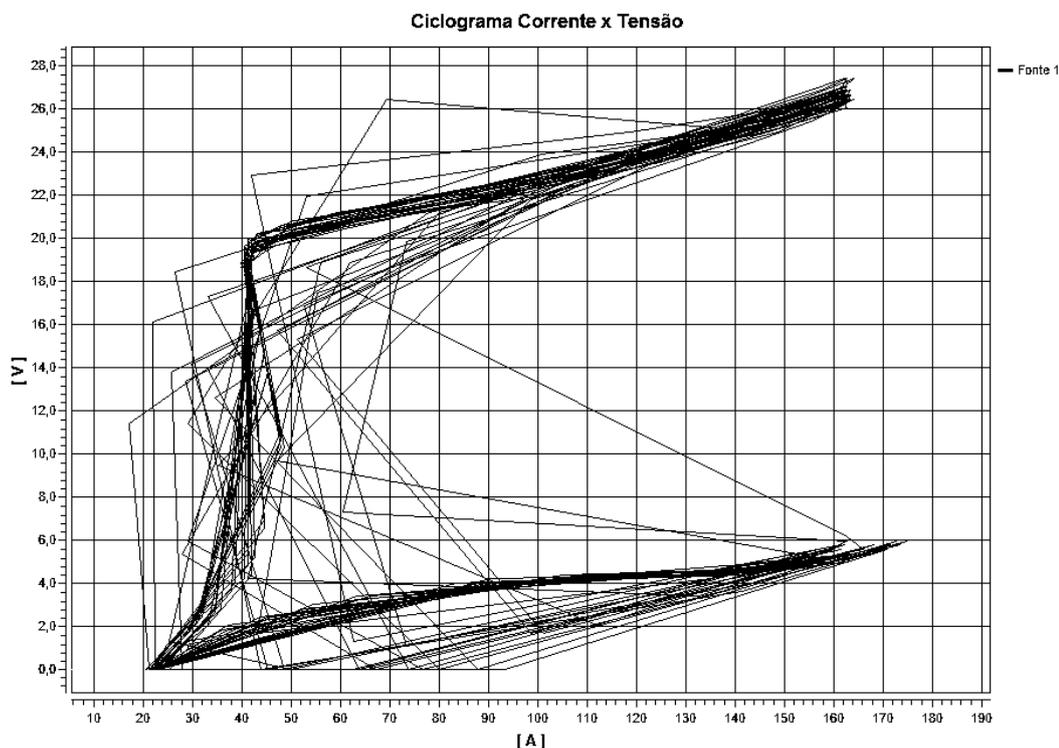


Figura 58 - Ciclograma do processo STT com arame de 1,0 mm

#### 4.3.3 Chanfro U e Arame de 1,0 mm e 1,2 mm

Para este caso não foi possível obter um cordão de solda adequado. Foram feitas diversas tentativas, inclusive a diminuição do *gap* para 1,0 mm. No caso de um *gap* superior a 1,0 mm o arame perfurou com grande facilidade o chanfro ou levou a um reforço de raiz excessivamente grande. Já para o caso de um *gap* de 1,0 mm houve boa penetração na posição plana e falta de penetração nas demais posições, provavelmente devido ao fechamento do espaçamento. Neste caso o mais adequado seria a utilização de um chanfro com o nariz mais espesso, o que impediria que o arame o perfurasse.

#### 4.4 Experimentos Extras

A partir da avaliação inicial dos experimentos anteriores, dois experimentos extras, um para cada processo de soldagem, foram executados. As escolhas de parâmetros de soldagem e outros (arame, tipo de chanfro e etc.) foram feitas pela observação do aspecto

superficial dos cordões de solda executados anteriormente. Estes experimentos, diferentemente dos anteriores, foram soldados em tubos com parede de 12,7 mm de espessura, devido a não disponibilidade de mais tubos com a espessura adotada anteriormente (10,2 mm). Aqui mais uma vez a vazão de gás adotada foi de 23 l/min.

#### 4.4.1 STT com CO<sub>2</sub>

Além de ter menor custo em relação ao argônio, a possibilidade de se obter penetrações mais largas e profundas com o gás CO<sub>2</sub>, foram fatores que levaram a execução de um experimento que adotasse este gás. Na verdade, os programas para a execução de passe de raiz disponíveis na fonte de soldagem da Lincoln foram desenvolvidos para o uso de CO<sub>2</sub> puro e não para o gás C25. A fabricante promete soldas com poucos respingos, alta estabilidade e qualidade mesmo soldando com este gás.

Para verificar estas qualidades prometidas alguns experimentos foram feitos até se chegar a um cordão de solda ideal. Nestes procedimentos foi adotado o chanfro “V” e o arame de 1,0 mm de diâmetro. Os parâmetros adotados para a execução do passe de raiz considerado adequado, por inspeção visual, são mostrados na Tabela 14.

Valores Ajustados								Valores Medidos			
Va [m/min]	TRIM	PEAK	Vs [cm/min]	a [mm]	f [Hz]	DBPC [mm]	$\alpha_{tocha}$ [graus]	Gap [mm]	Im [A]	Um [V]	Va [m/min]
4,9	1	5	18,4	0	0	14	12	2,5	117	17,7	5,1

Tabela 14 - Parâmetros de soldagem adotados para a execução do processo STT com CO<sub>2</sub>

Os únicos parâmetros aqui alterados, em relação ao procedimento que adotou C25 como gás de proteção, foram o TRIM e a inclinação da tocha. O TRIM foi alterado de modo a diminuir a altura do arco voltaico e, portanto, a tensão elétrica. Isto porque o CO<sub>2</sub> tende a aumentar a potência (tensão elétrica) do arco. Já a inclinação da tocha foi levemente reduzida para evitar a perfuração do chanfro. O procedimento foi realmente estável. Pela simples observação seria muito difícil distinguir se o processo estava utilizando CO<sub>2</sub> ou C25 como gás de proteção. A aparência do cordão de solda obtido pode ser vista na imagem abaixo (Figura 59).

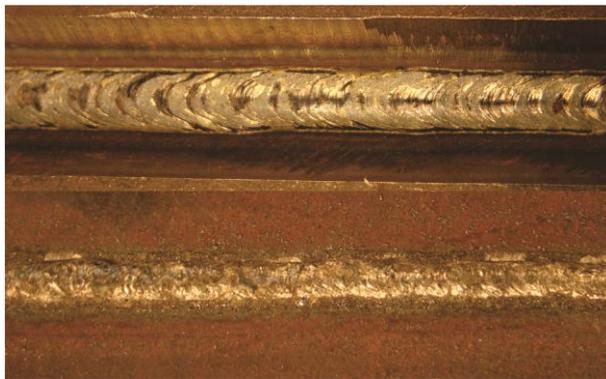


Figura 59 - Cordão de solda do processo STT com CO<sub>2</sub>

Observando o aspecto superficial da raiz e da face do cordão de solda, pode-se dizer que ele é tão bom quanto, ou melhor, do que os obtidos com o gás de proteção C25. As macrografias seguem na Figura 60 abaixo e as suas medidas na Tabela 15.

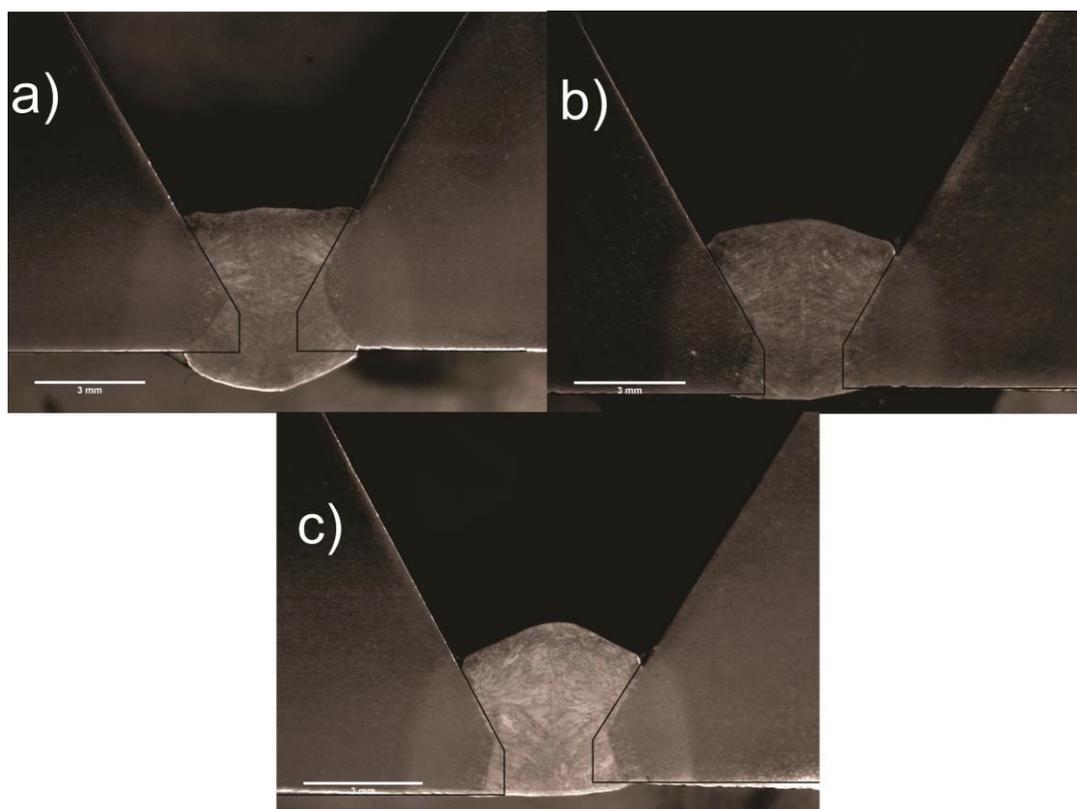


Figura 60 - Macrografias do cordão de solda do processo STT com CO<sub>2</sub>: a) posição plana, b) vertical e c) sobre cabeça

Identificação	Área Tot. [mm <sup>2</sup> ]	Área Dil. [mm <sup>2</sup> ]	Diluição [%]	R. Raiz [mm]	Espessura [mm]	Ângulo M. [graus]	High-Low [mm]
<b>Plana</b>	17,59	3,71	21%	1,09	5,03	112,11	0,04
<b>Vertical</b>	17,37	1,89	11%	0,31	4,94	156,70	0,15
<b>Sobre C.</b>	14,99	1,83	12%	0,36	4,39	142,39	0,31

Tabela 15 - Medições das macrografias do cordão de solda do processo STT com CO<sub>2</sub>

A qualidade do cordão de solda, também pela análise das macrografias, é indiscutível. Não há presença de defeitos nas seções mostradas. As taxas de diluição mostraram menor disparidade em diferentes posições. A espessura mínima da raiz obtida foi de 4,49 mm, o que não seria suficiente para eliminação do passe quente, se levar em consideração como certa a espessura indicada no procedimento qualificado pela Polysoude [1]. O ângulo de molhabilidade, assim como para os outros procedimentos com STT, se mostrou mais uma vez adequado, tornando a transição do metal base para o metal de solda suave. Aqui é de se ressaltar, não só para este experimento, como para os outros que adotaram o STT, que a geometria da face superior do cordão de solda mostra potencial para ser melhorada (superfície mais plana) com o emprego de tecimento durante a soldagem.

Observando as radiografias (Figura 61) nota-se a total ausência de defeitos. O cordão de solda é totalmente homogêneo. Os pequenos riscos encontrados quando soldando com C25 não apareceram. Até agora este é o melhor resultado obtido e seria, portanto, aprovado pela Norma API 1104.



Figura 61 - Radiografia do cordão de solda com o processo STT com CO<sub>2</sub>

A estabilidade do processo é mais uma vez avaliada qualitativamente através da observação do seu ciclograma I x U (Figura 62).

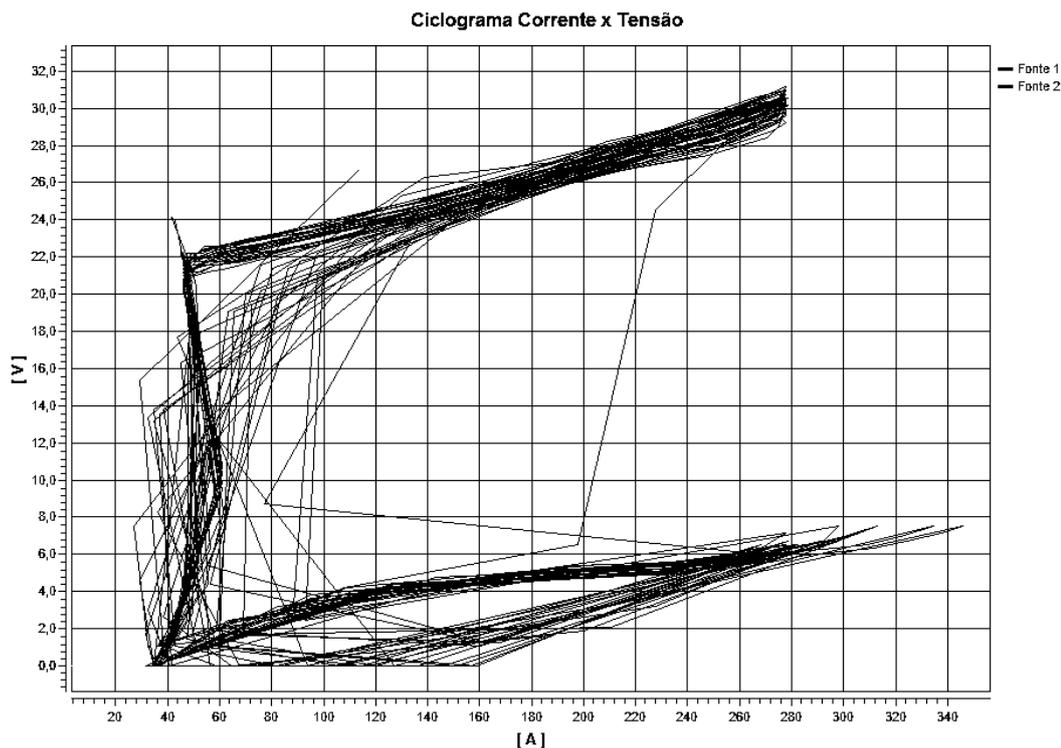


Figura 62 – Ciclograma I x U do processo STT com CO<sub>2</sub>

Aqui é possível observar que o processo com o uso de CO<sub>2</sub> é tão estável quanto os processos utilizando C25. Isto fica ainda mais evidenciado pela ausência total de defeitos ao longo do cordão de solda.

#### 4.4.2 MIG/MAG Convencional com *Backing* de Cerâmica

A motivação para a execução de um experimento que fizesse o uso de um *backing* de cerâmica, ao invés de um de cobre, se deve pela não aceitabilidade, por parte de algumas instituições (empresas, empreiteiras e etc.), de inclusões de cobre no cordão de solda. Aqui há de se verificar se é possível utilizar este tipo de *backing* para aplicação de soldagem orbital.

Como para o caso anterior, no presente caso se partiu de parâmetros adotados anteriormente para o processo MIG/MAG Convencional. A escolha se deu com base na análise da qualidade superficial dos cordões de solda. No presente experimento foi adotado o chanfro tipo “U”, *gap* zero e o arame com diâmetro de 1,0 mm. Os parâmetros adotados para a realização de um passe de raiz pode ser vistos na Tabela 16.

Valores Ajustados							Valores Medidos				
Va [m/min]	U [V]	Ks	Kd	Vs [cm/min]	a [mm]	f [Hz]	DBPC [mm]	$\alpha_{tocha}$ [graus]	Im [A]	Um [V]	Va [m/min]
12	24,8	30	30	90,0	1,8	5	15	7,5	227	22,6	12,2

Tabela 16 - Parâmetros adotados para a execução do experimento com o processo MIG/MAG Convencional com *backing* de cerâmica

Os valores ajustados são idênticos aos adotados na execução do passe de raiz com um *backing* de cobre. Inicialmente se tentou fixar o *backing* de cerâmica apenas pela fita adesiva. Esta fixação não se mostrou suficiente para suportar a força do arame o que levou ao descolamento do *backing* e insucesso da solda. Em seguida o *backing* foi fixado via adesivo e também pressionado contra o tubo com o suporte adotado para a fixação do *backing* de cobre. Neste caso o *backing* ficou no lugar, no entanto o cordão ficou irregular ao longo de seu comprimento. Isto porque a superfície do *backing*, que é côncava e não encosta diretamente sob a superfície do chanfro, diferentemente do *backing* de cobre, deixou espaços vazios que levaram a instabilidade do processo. Para isto, como não se dispunha de outro tipo de *backing*, este foi simplesmente virado de cabeça para baixo, permitindo com que uma superfície plana ficasse em contato com a superfície sob o chanfro (Figura 63).

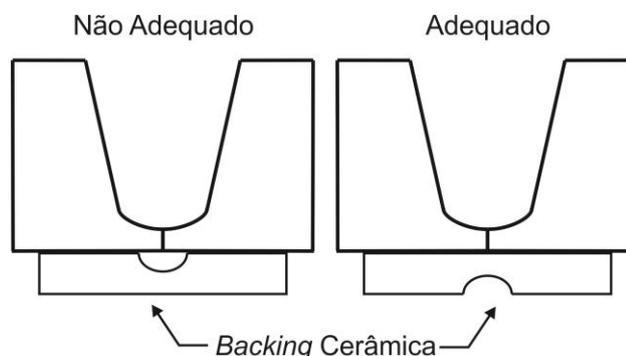


Figura 63 - Esquema posicionamento do *backing* de cerâmica

A alteração se mostrou adequada e possibilitou a soldagem de um passe de raiz com boa aparência superficial e penetração constante (Figura 64). Na raiz, como indicado por setas na figura abaixo, pode-se ver a presença de sobressaltos. Estes correspondem ao espaçamento compreendido entre duas peças de cerâmica adjacentes do *backing*, devido à curvatura do tubo. Ainda é de se notar o aspecto metálico da raiz, muito melhor e diferente do que foi observado quando soldando com um *backing* de cobre.

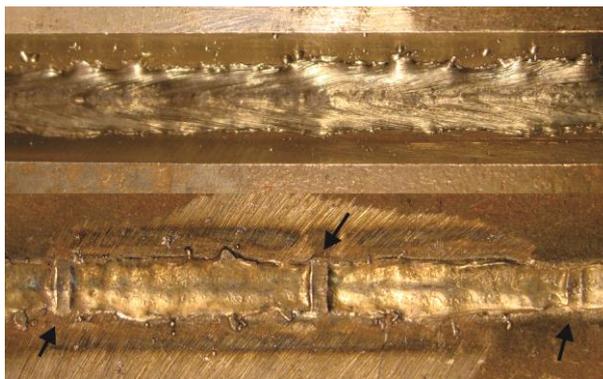


Figura 64 - Cordão de solda com o processo MIG/MAG Convencional com *backing* de cerâmica

As macrografias do cordão de solda e suas medidas podem ser vistas na Figura 65 e Tabela 17 respectivamente.

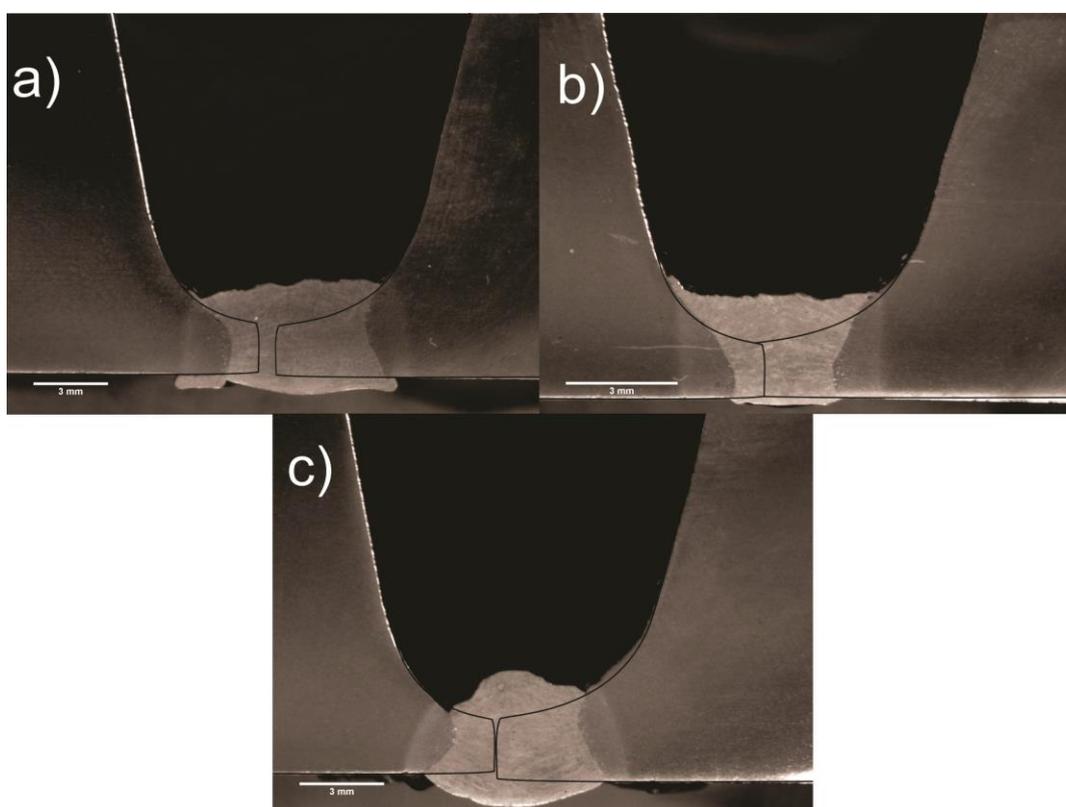


Figura 65 - Macrografias do cordão de solda com o processo MIG/MAG Convencional com *backing* de cerâmica: a) posição plana, b) vertical e c) sobre cabeça

Identificação	Área Tot. [mm <sup>2</sup> ]	Área Dil. [mm <sup>2</sup> ]	Diluição [%]	R. Raiz [mm]	Espessura [mm]	Ângulo M. [graus]	High-Low [mm]
Plana	27,55	12,27	45%	0,75	4,65	85,24	0,16
Vertical	10,37	4,97	48%	0,26	2,99	146,59	0,00
Sobre C.	26,61	11,63	44%	1,18	4,91	135,71	0,29

Tabela 17 - Medidas das macrografias do cordão de solda do processo MIG/MAG Convencional com *backing* de cerâmica

Não é possível identificar a presença de defeitos pelas macrografias. Aqui é notável a grande taxa de diluição, maior em média do que as encontradas quando soldando com um *backing* de cobre. O reforço da raiz não apresentou grandes disparidades, como já era esperado. Mesmo com o *backing* de cerâmica há a presença de um entalhe, como pode ser visto na macrografia correspondente a posição plana.

Através da análise das radiografias (Figura 66) já é possível notar a grande diferença em relação às radiografias obtidas quando soldando com um *backing* de cobre. Não há presença de grandes poros no cordão de solda. Talvez a ausência de poros se deva a menor taxa de calor extraído do cordão de solda por parte do *backing* de cerâmica, em comparação ao *backing* de cobre, que possui alta condutividade térmica. Encontraram-se apenas pequenos riscos escuros, que em alguns casos ascendem à superfície da peça (circulado) ou são totalmente internos (indicado pelas setas). A grande marca escura circundada não indica um defeito. Neste caso ela indica a ausência de um cordão de solda, pois fica na região de encontro dos dois cordões de solda que completam a soldagem do tubo. Todos os riscos têm a mesma característica: encontram-se na região central do cordão de solda e a primeira vista parecem indicar uma falta de penetração da raiz. Pelo fato de ficarem localizados na região central e superior do cordão de solda, eles podem ser rechupes provenientes da alta velocidade de soldagem adotada. A norma não qualifica rechupes como defeitos, mas eles podem ser assimilados a poros de vazio e avaliados segundo os critérios adotados para estes. Pela quantidade deles o cordão de solda seria reprovado conforme a Norma API 1104. Na região próxima às 12 horas aparece uma linha escura circulada, a qual indica uma falta de fusão exposta à superfície na lateral do cordão. Um ensaio de dobramento foi feito e uma macrografia da seção rompida foi preparada. Pode-se observar que o cordão rompeu exatamente sobre a linha que separa o material base do metal de solda na metade superior do cordão e na ZAC na metade inferior, como já era esperado (Figura 67). Pode-se verificar que na parte superior do cordão de solda havia realmente uma pequena falta de fusão. Esta, no entanto, é em grande parte formada por um dos respingos resultantes da instabilidade do processo que podem ser observados na Figura 64 e atuou possivelmente como um concentrador de tensão, o qual induziu a fratura na interface na parte superior. Será que um passe quente não corrigiria os defeitos superficiais anteriormente abordados, assim como a falta de fusão exposta à superfície? Caso este passe seja suficiente para corrigir os defeitos, este cordão de solda poderia ser aprovado de acordo com a Norma API 1104.

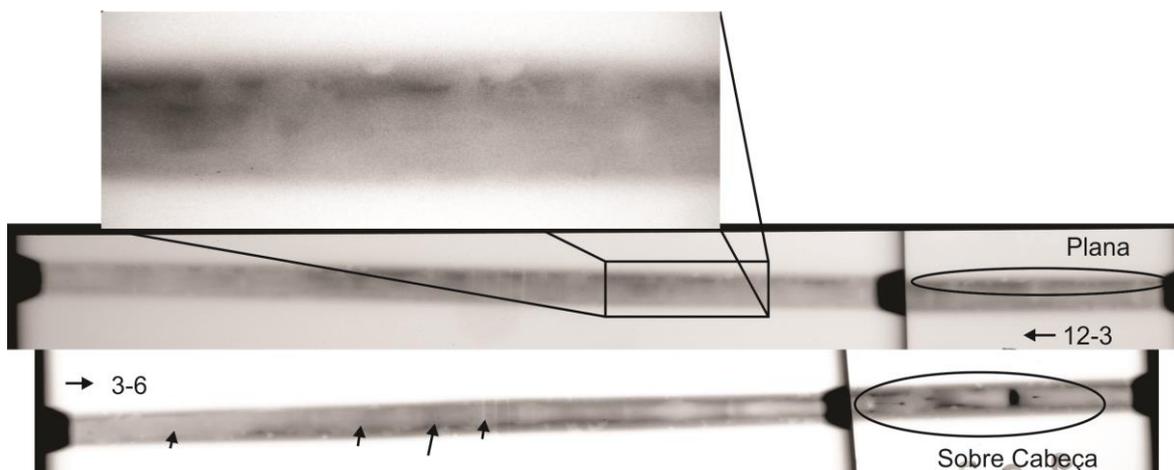


Figura 66 - Radiografia do cordão de solda com o processo MIG/MAG Convencional com *backing* de cerâmica



Figura 67 - Imagem da região da fratura

A análise da estabilidade do procedimento adotado é feita através do ciclograma I x U (Figura 68) e do histograma dos tempos de transferência (Figura 69). Fica difícil analisar a estabilidade do processo apenas pela observação do ciclograma, caso não haja uma grande disparidade entre dois procedimentos. Aqui se pode então somente reconfirmar a maior estabilidade do processo STT frente ao MIG/MAG Convencional. Já a análise do histograma permite fazer uma comparação direta com os outros procedimentos, pelo processo MIG/MAG Convencional, adotados anteriormente. Pode-se dizer, pelo desvio padrão, que a repetibilidade do procedimento ficou em um patamar médio, superior ao arame de 1,2 mm de diâmetro, porém inferior ao arame de 1,0 mm de diâmetro com *backing* de cobre. Isto, no entanto, não reflete a realidade, visto a redução marcante no número e dimensões dos defeitos encontrados no presente cordão de solda. Como nos

casos anteriores pode ser observada uma variação na DBCP durante a soldagem, a qual novamente pode ter interferido na estabilidade do processo.

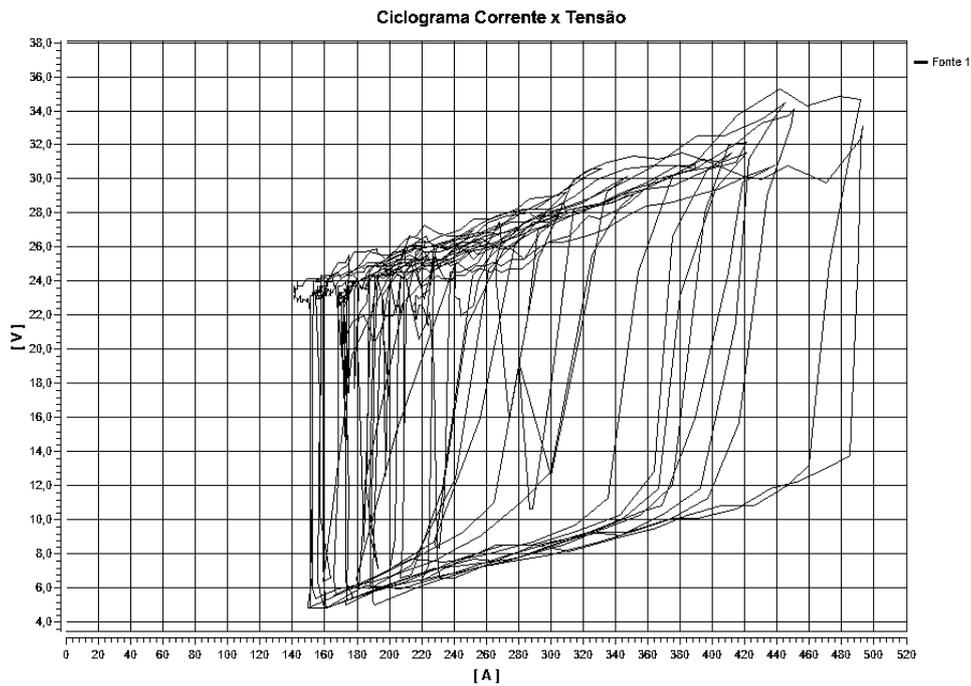


Figura 68 - Ciclograma I x U do processo MIG/MAG Convencional com *backing* de cerâmica

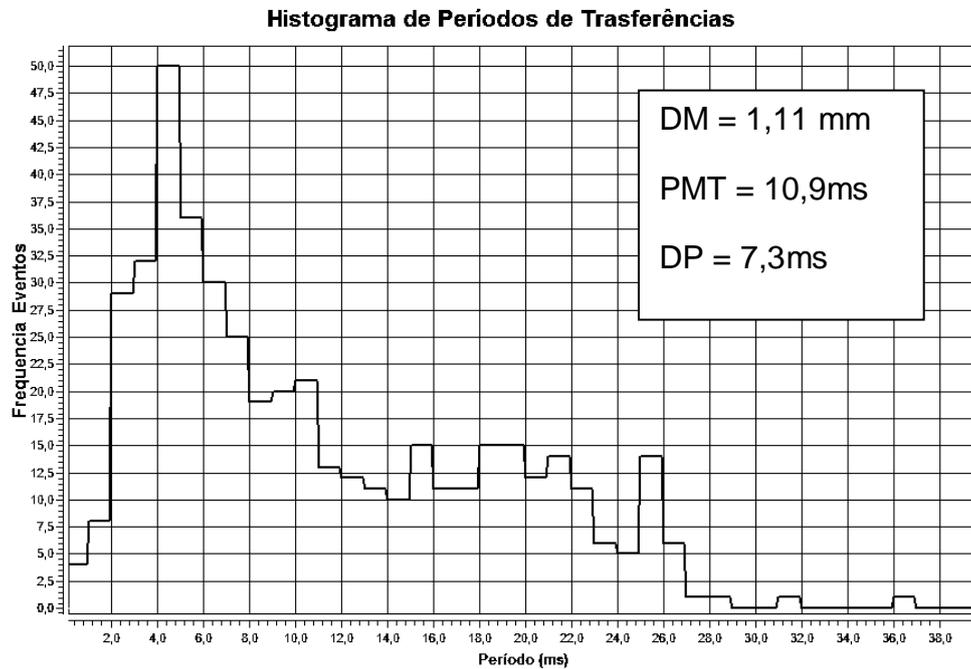


Figura 69 - Histograma do processo MIG/MAG Convencional com *backing* de cerâmica

## 5 Conclusões

Algumas conclusões puderam ser tomadas com o presente trabalho. Primeiramente é de se destacar os cuidados necessários na usinagem do chanfro e alinhamento dos tubos. Uma deformação excessiva do tubo, devido a sua fixação em uma chanfradeira, pode levar a um chanfro com espessura de nariz não constante e conseqüentemente a um cordão de solda sofrível. Acredita-se que em campo a situação seja melhor do que a observada na realização dos experimentos, devido a grande dimensão dos tubos (seção resistente à deformação transversal maior).

Em relação aos experimentos executados, pode-se chegar as seguintes conclusões:

- O Tartilope V4 se mostrou adequado para a execução de todos os experimentos, apesar de discrepâncias observadas na amplitude de tecimento (Figura 70). Estas foram observadas e medidas por um sensor quando soldando entre 3 e 6 horas, com o processo Convencional, com o braço do manipulador (o qual é responsável pelo movimento de tecimento) quase que totalmente esticado. No caso do braço recolhido esta discrepância não foi observada;

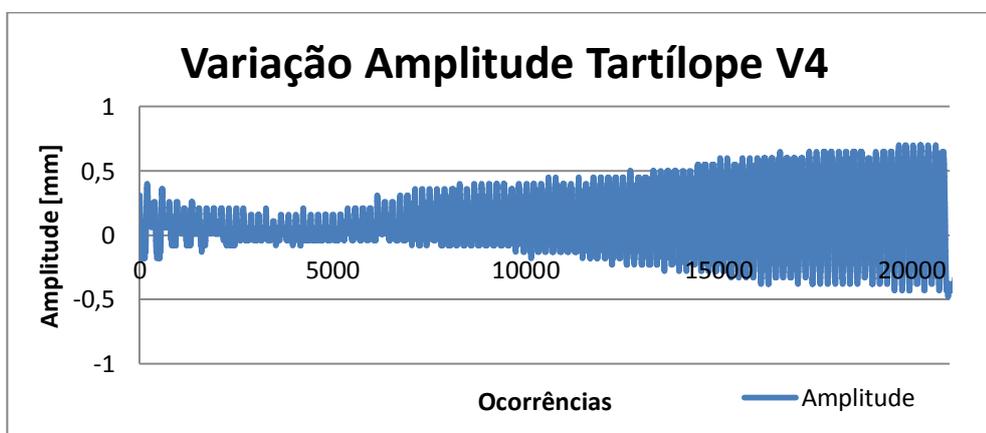


Figura 70 – Trecho da variação da amplitude de tecimento em um teste feito na ascendente com  $f=5$  Hz e  $a=1,0$  mm

- O SAP se mostrou uma ferramenta importante para avaliação dos processos de soldagem, ressaltando-se que não é adequado para medições instantâneas do processo STT, pois é lento para este;
- Para o processo MIG/MAG Convencional, na faixa de parâmetros adotados e para as dimensões de chanfro estudadas, deve-se usar um chanfro tipo “U”, visto que um chanfro tipo “V”, devido à sua maior robustez, impede a penetração completa da raiz;

- A análise pelas radiografias dos cordões de solda executados com o processo MIG/MAG Convencional e *backing* de cobre mostrou que esses não são totalmente homogêneos e, portanto, que o procedimento adotado não é muito robusto. No entanto, o procedimento que adotou o *backing* de cerâmica mostra maior potencial e robustez, visto que seus defeitos são menores e superficiais e poderiam, portanto, ser corrigidos com a execução de um passe quente;
- Os cordões de solda obtidos com o processo MIG/MAG Convencional, devido a presença de um *backing*, possuem em alguns casos um pequeno ângulo de molhabilidade na raiz (concentradores de tensão, menores que 90°), ao contrário do processo STT, que apresentou sempre grandes ângulos, o que garante uma transição suave do metal base para o metal de solda;
- Não se pode afirmar pelo presente trabalho que não é possível a execução de um passe de raiz isento de falhas com o processo MIG/MAG Convencional, alguns autores [6,3] conseguiram executar passes de raiz com qualidade com este procedimento, porém em outro patamar (velocidades de alimentação de arame consideravelmente menor);
- Para o processo STT, na faixa de parâmetros explorada e dimensões de chanfro adotadas, deve-se usar um chanfro tipo “V”, visto que um chanfro tipo “U” com nariz de 1,4 mm é facilmente perfurado pelo arame;
- O processo STT, quando soldando com gás de proteção C25, mostra potencial para eliminação do passe quente devido a grande espessura do cordão de solda (superior à 5,5 mm);
- Todos os procedimentos de soldagem que adotaram o processo STT tiveram seus cordões de solda aprovados segundo a Norma API 1104, sendo que o cordão de solda executado com CO<sub>2</sub> puro foi o único que não apresentou nenhuma imperfeição;
- O processo STT, por ser sinérgico, é de fácil uso e ajustes podem ser feitos facilmente por operadores menos experientes. Já o processo MIG/MAG Convencional não sinérgico demanda um maior conhecimento para a realização de ajustes (pessoal mais qualificado);
- Verificou-se que o processo STT impõe tolerâncias estreitas ao espaçamento (*gap*) entre duas seções, como indicado pela literatura para os processos MIG/MAG [1],

já que uma diferença nominal de 0,5 mm separou um cordão de solda com penetração total na raiz de um sem penetração total;

- Durante a execução dos experimentos houve variação significativa da DBCP, devido principalmente ao desalinhamento de uma ou mais seções de tubo, de até 5 mm em uma única soldagem. Isto pode ter interferido significativamente na estabilidade do processo MIG/MAG Convencional. Ao mesmo tempo reafirmou a robustez do processo STT;
- Através da análise dos ciclogramas I x U pode-se constatar uma maior estabilidade para o processo STT em relação ao MIG/MAG Convencional. Já os histogramas dos tempos de transferência possibilitaram uma avaliação quantitativa da repetibilidade dos procedimentos que adotaram o processo MIG/MAG Convencional;
- A Norma API 1104 se mostra muito tolerante em relação aos defeitos. Isto leva a crer que em campo a integridade dos cordões de solda deve ser sofrível;
- A produtividade de um processo de soldagem não deve considerar somente a velocidade de soldagem ou a taxa de deposição de arame independentemente. Outros fatores como número de passes para o preenchimento da junta, índice de refugo, retrabalho e outros devem ser considerados.
- Os cordões de solda executados sobre junta tipo “U”, com o processo MIG/MAG Convencional, apresentaram maiores taxas de diluição do que os executados sobre junta tipo “V”, com o processo STT.

## 6 Trabalhos Futuros

---

Com o desdobramento do presente trabalho, surgiram algumas questões interessantes, que poderiam ser exploradas mais adiante, como:

- Verificar a operacionalidade do processo STT sobre chanfros do tipo “U” com espessura de nariz mais robusta, já que este aparentemente garante melhor fusão das bordas;
- Comparar o processo STT com o MIG/MAG Convencional, trabalhando com ambos em faixas similares (diâmetro de gota, velocidade de arame e etc...), para verificação da possível redução de potência para o primeiro;
- Integrar um corretor de trajetória ao Tartilope V4, de modo a diminuir a interferência do operador de soldagem durante a execução do procedimento e garantir maior reprodutibilidade das juntas soldadas,
- Integrar um corretor automático de altura da tocha de soldagem (DBCP), especialmente quando soldando com o processo MIG/MAG Convencional, visto que a estabilidade deste é prejudicada quando há variações nesta altura;
- Verificar experimentalmente a possibilidade de eliminação do passe quente quando soldando com o processo STT;
- Qualificar procedimentos para união completa de uma junta ou pelo menos com um passe de preenchimento/quente, de modo a verificar se este tem potencial para corrigir defeitos superficiais do passe de raiz;
- Explorar outros processos de soldagem com curto circuito controlado e compará-los entre si;
- Verificar a operacionalidade dos processos de soldagem abordados para a realização de soldagem na vertical descendente e ascendente (360°);
- Desenvolver um *software* para o SAP que possibilite a avaliação dos tempos de transferência para processos especiais de curto circuito, como o STT;
- Desenvolver uma acopladeira com *backing* cerâmico.

## 7 Referências

---

1. POLYSOUDE. **Increase in productivity: a reality with the all position MIG-MAG/GMAW welding process.** [S.l.].
2. JEFFUS, L. F. **Welding: Principles and Applications.** [S.l.]: Thomson, 129-131 p.
3. MAGALHÃES, V. A. N. **SIMULAÇÃO FÍSICA POR RETIFICAÇÃO DA SOLDAGEM DE DUTOS COM PROCESSO GMAW.** Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Uberlândia, p. 138. 2012.
4. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA / MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2021.** Brasília. 2012.
5. VIGLIANO, R. Centro de Tecnologias em Dutos. Disponível em: <<http://www.ctdut.org.br/blog/noticias/brasil-concentrara-19-do-mercado-de-dutos-offshore-ate-2017-energia-hoje>>. Acesso em: 24 jan. 2013.
6. DIRENE, H. F.; SILVA, R. H. G.; DUTRA, J. C. **Comparação do Processo MIG/MAG em Transferência por Curto-Circuito com Controle de Corrente (CCC) com o Processo STT na Soldagem de Passes de Raiz em Dutos.** XXXVIII CONSOLDA. Ouro Preto: [s.n.]. 2012.
7. FORTES, C.; J.R., D. **Soldagem de Tubulações - ESAB.** [S.l.]: ESAB, 2004.
8. RORVIK, G.; HALDORSEN, L. M.; BERGE, J. O. Trends in welding of offshore flowlines and pipelines. **Welding an Cutting**, p. 26-32, Jan 2012.
9. JOHNSEN, M. R. U.S. Pipeline Industry Enters a New Era. **Welding Journal**, v. 78, p. 37-41, November 1999.
10. KAH, P. C. **Welding of sheet metal using modified short arc MIG/MAG . welding process.** Lappeenranta University of Technology. Lappeenranta, p. 72. 2007.
11. SILVA, R. H. G. **SOLDAGEM MIG/MAG EM TRANSFERÊNCIA METÁLICA . POR CURTOCIRCUITO.** Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, p. 113. 2005.
12. GOECKE, S. F. **EWM coldArc - Energiereduzierter Kurzlichtbogen.** EWM . Hightech Welding GmbH. [S.l.], p. 17. 2006.
13. COURT, S. A.; POLLARD, G. Inclusion Chemistry and Morphology in Shielded

- . Metal Arc (SMA) Steel Weld Deposits. **Elsevier Science Publishing**, May 1989. 219-243.
- 14 UUSITALO, J. FastROOT - A new welding process for root pass and thin sheet . welding. **Kemppi Pro News**, p. 4-7, 2006.
- 15 RENELT, E. Automatic TIG root pass welding, using a non-current-carrying . filler wire in the vertical position. **Welding International**, 1988. 280-283.
- 16 BEESON, R. Pipeline Welding Goes Mechanized. **Welding Journal**, v. 78, p. . 47-50, November 1999.
- 17 SILVA, R. H. G.; DUTRA, J. C.; GOHR, R. J. Fundamentos Científicos e . Tecnológicos para o Desenvolvimento do Processo MIG/MAG por Curto-Circuito Controlado (CCC) - Uma Revisão da Literatura. Parte 2 de 3: Formação da Gota Metálica, Gases de Proteção, Mecanismos de Penetração, Aporte Térmico e A. E. **Soldagem e Inspeção**, p. 326-335, Out/Dez 2007.
- 18 DILTHEY, U. **Welding Technology 1: Welding and Cutting Technologies**. . Aachen: Institut für Schweisstechnik und Fügetechnik, RWTH Aachen.
- 19 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.
- 20 YAPP, D.; BLACKMAN, S. A. Recent Development in High Productivity . Pipeline Welding. **J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.**, January-March 2004. 89-97.
- 21 AWS. **WELDING HANDBOOK – “Welding Processes”**. 8th. ed. Miami: . American Welding Society, v. 2, 1991.
- 22 SILVA, R. H. G.; DUTRA, J. C.; GOHR, R. J. Fundamentos Científicos e . Tecnológicos para o Desenvolvimento do Processo MIG/MAG por Curto-Circuito Controlado (CCC) - Uma Revisão da Literatura. Parte 3 de 3: Princípios dos Sistemas MIG/MAG em Curto-Circuito com Controle de Corrente. **Soldagem e Inspeção**, p. 70-81, Jan/Mar 2008.
- 23 STAVA, E. K. The Surface-Tension-Transfer Power Source: A New, Low- . Spatter Arc Welding Machine. **Welding Journal**, p. 25-29, January 1993.
- 24 API. **Welding of Pipelines and Related Facilities - API 1104**. America . Petroleum Institute. [S.l.]. 2005.

- 25 AWS. **Structural Welding Code for Steel**. 15th. ed. [S.I.]: American Welding Society, 1996.
- 26 IMC SOLDAGEM. MANUAL MTE DIGITEC 450/600, 2005. Disponível em: [. <http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/manuais/digitec\\_manual\\_instrucoes\\_5ed\\_%282002%29.pdf>](http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/manuais/digitec_manual_instrucoes_5ed_%282002%29.pdf). Acesso em: jun. 2013.
- 27 SPS - SISTEMAS E PROCESSOS DE SOLDAGEM. Manual Tartilope V4. Disponível em: [. <http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/manuais/tartilope\\_V4\\_manual\\_usuario\\_%282010%29.pdf>](http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/manuais/tartilope_V4_manual_usuario_%282010%29.pdf). Acesso em: jun. 2013.
- 28 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: jun. 2013.